



Instituto Politécnico de Tomar

Escola Superior de Tecnologia de Tomar

**Análise da produção de gesso a partir da
dessulfuração dos gases de combustão na
Central Termoeléctrica do Pego. Contribuições
estatísticas**

Relatório de Estágio

Cristiano José Carvalho Marques

Mestrado em Tecnologia Química

Tomar/ Novembro/ 2012



Instituto Politécnico de Tomar

Escola Superior de Tecnologia de Tomar

Cristiano José Carvalho Marques

**Análise da produção de gesso a partir da
dessulfuração dos gases de combustão na
Central Termoeléctrica do Pego. Contribuições
estatísticas**

Relatório de Estágio

Orientado por:

Doutora Isabel Nogueira – Instituto Politécnico de Tomar

Doutor Luís Grilo – Instituto Politécnico de Tomar

Relatório de Estágio
apresentado ao Instituto Politécnico de Tomar
para cumprimento dos requisitos necessários
à obtenção do grau de Mestre
em Tecnologia Química

RESUMO

Associado à produção de energia eléctrica nas Centrais Termoeléctricas a carvão está a emissão de efluentes gasosos nocivos para o Ambiente e para os seres vivos. Destes efluentes podem-se destacar os óxidos de azoto (NO_x), o dióxido de enxofre (SO_2) e partículas (cinzas volantes).

Este Relatório de Estágio, inserido no Trabalho Final de Mestrado em Tecnologia Química, foi desenvolvido no âmbito do Estágio realizado no Laboratório Químico da Central Termoelétrica do Pego (LQCTP). Na primeira parte descreve-se o processo de produção de energia eléctrica da Central, abordando de seguida os processos de desnitrificação (SCR – *Selective Catalytic Reduction*) e dessulfuração (FGD – *Flue Gas Desulphurization*), utilizados na redução e controlo das emissões de NO_x e SO_2 , respectivamente. Na segunda parte, como o estudo do processo de dessulfuração é mais aprofundado, procede-se à análise estatística de variáveis consideradas importantes no controlo deste processo (“pH” e “densidade da pasta de gesso”; e “% de humidade do gesso”), com dados que foram recolhidos no LQCTP. A análise estatística realizada compreende dois subcapítulos: estatística descritiva univariada, com o objectivo de organizar e analisar o comportamento das variáveis na amostra, com o intuito de retirar ilações sobre as mesmas na população; e a inferência estatística, com o objectivo de comparar as variáveis em estudo recorrendo a testes estatísticos e à construção de cartas de controlo estatístico de qualidade para as variáveis consideradas, nos dois absorvedores, com o objectivo de monitorizar o processo e permitir detectar, possíveis, desvios relativamente às especificações.

Palavras-Chave: Central Termoelétrica do Pego; Desnitrificação; Dessulfuração; Análise estatística comparativa; Cartas de controlo de qualidade.

ABSTRACT

The generation of electric power in coal-based thermoelectric power plants is linked to the release of greenhouse gases into the environment which are harmful to living organisms. Among these emissions are those of nitrogen oxide (NO_x), sulphur dioxide (SO_2) and particles (fly ashes).

This paper makes part of the Final Project of the Master's Degree in Chemical Technology and has been carried out in the LQCTP (Chemical Laboratory at Pego's Thermoelectric Power Plant). The first part of the Report describes the power production process at the power station including denitrification (SCR – Selective Catalytic Reduction) and desulphurization (FGD – Flue Gas Desulphurization) used for the control of NO_x and SO_2 emissions respectively. The second part of the Report gives a detailed description of the desulphurization process including a statistical analysis of the key variables in the control of this process (“pH” and “density of the gypsum paste”; and “percentage moisture content”) from data collected at LQCTP. The statistical analysis includes two sub-chapters: univariated descriptive statistics to organise and analyse the performance of sample variables in order to draw conclusions on their impact on population; and statistical inference used to compare the variables under study with the help of statistical tests and quality control charts for the variables considered in both absorbers with a view to monitoring the process and determine possible deviations relative to the specifications.

Keywords: Pego's Thermoelectric Power Plant; Denitrification; Desulphurization; Comparative statistical analysis; Quality control charts.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar expressos os meus mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas que me ajudaram no meu percurso académico e sem as quais a realização deste trabalho seria impossível.

Em primeiro lugar quero deixar uma palavra de apreço e agradecimento aos meus orientadores, à Professora Isabel Nogueira e ao Professor Luís Grilo por toda a disponibilidade, interesse, colaboração, paciência e partilha de conhecimentos para a realização deste trabalho.

Quero agradecer também a todos os trabalhadores da Central Termoelétrica do Pego, empresa de acolhimento para a realização do estágio curricular, em particular ao Engenheiro Felicíssimo Matos, pela sua disponibilidade e toda a informação prestada, bem como ter-me dado a oportunidade de contactar com o mundo industrial pela primeira vez. À Engenheira Carla Sousa, pelo acolhimento no Laboratório Químico, por toda a informação e esclarecimentos prestados e pela disponibilidade na recolha de dados. Às analistas do Laboratório Químico: Maria João Cordeiro, Maria João Ribeiro, Vera Oliveira e Sara Pereira, pela grande ajuda na recolha de dados, pelos conselhos e conhecimentos prestados. À Engenheira Maria José, pela disponibilidade e pelo fornecimento dos dados relativos às emissões de efluentes gasosos da Central e ao Sr. Luís Mariquitos, por todos os conhecimentos prestados, pelo interesse na realização deste trabalho e pela ajuda nas fotos tiradas a alguns equipamentos da Central.

Por fim agradeço às pessoas mais importantes na minha vida, os meus pais, por estarem sempre presentes e por toda a ajuda prestada nos momentos mais difíceis, sem o seu apoio todo este percurso seria impossível.

Índice

RESUMO	I
ABSTRACT	III
AGRADECIMENTOS	V
Índice de Figuras	IX
Índice de Tabelas	X
Lista de abreviaturas e siglas	XI
Lista de Símbolos	XIII
Introdução	1
1. Central Termoelétrica do Pego	3
1.1. Apresentação da Central	3
2. Funcionamento da Central	5
2.1. Transporte do Carvão	7
2.2. Sistema de ar e queimadores	9
2.3. Água utilizada no processo	10
2.3.1. Circuito de água de alimentação	10
2.3.2. Circuito de água de refrigeração	12
2.4. Condensador	13
2.5. Turbinas	14
2.5.1. Turbina de alta pressão	14
2.5.2. Turbina de média pressão	15
2.5.3. Turbinas de baixa pressão	16
3. Emissões de efluentes gasosos da Central	19
3.1. Controlo das emissões de gases na Central	19
3.1.1. Processo de desnitrificação	21
3.1.2. Partículas	22
3.1.3. Processo de dessulfuração	23
4. Variação das emissões de NO _x , SO ₂ e partículas da Central	29
5. Laboratório Químico	33
5.1. Laboratório Químico e o controlo do processo de dessulfuração	34
5.1.1. Determinação do “pH da pasta de gesso”	37

5.1.2.	Determinação da “densidade da pasta de gesso”	37
5.1.3.	Determinação da “% de humidade do gesso”	38
6.	Análise estatística dos dados.....	39
6.1.	Estatística descritiva univariada	39
6.1.1.	Variável: pH da pasta de gesso	40
6.1.2.	Variável: Densidade da pasta de gesso	43
6.1.3.	Variável: % de humidade do gesso	46
6.2.	Inferência Estatística.....	49
6.2.1.	Testes de hipóteses para comparação de médias populacionais com amostras independentes.....	49
6.2.1.1.	Variável: pH da pasta de gesso.....	51
6.2.1.2.	Variável: Densidade da pasta de gesso.....	53
6.2.1.3.	Variável: % de humidade do gesso.....	55
6.2.2.	Intervalos de Confiança e Cartas de Controlo de qualidade	57
6.2.2.1.	Variável: pH da pasta de gesso.....	58
6.2.2.2.	Variável: Densidade da pasta de gesso.....	61
6.2.2.3.	Variável: % de humidade do gesso.....	63
7.	Considerações finais	65
8.	Bibliografia/Webgrafia	67
ANEXOS.....		69
Anexo 1 – Dados das emissões de NO _x , SO ₂ e partículas da Central		71
Anexo 2 – Métodos de Ensaio		77
2.1.	Gesso – Determinação da % de humidade (Gravimétrico).....	77
2.2.	Pasta aquosa de gesso – Determinação da densidade da slurry reactor e percentagem de sólidos	79
2.2.1.	Densidades relativas da água.....	83
2.3.	Pasta aquosa de gesso – Determinação da temperatura e do pH	84
Anexo 3 – Dados recolhidos no Laboratório Químico.....		87
3.1.	Determinação do pH, condutividade (K) e Temperatura – Pasta aquosa de gesso.....	87
3.2.	Determinação da Densidade – Pasta Aquosa de Gesso	88
3.3.	Determinação da % de humidade – Gesso.....	90

Índice de Figuras

Figura 1 – Esquema geral do processo de produção de energia eléctrica na Central Termoelétrica do Pego.	6
Figura 2 – Transporte do carvão para os Grupos da Central.	7
Figura 3 – Moinhos de carvão (Foto tirada em 12/7/2012).	8
Figura 4 – Queimadores (Foto tirada em 12/7/201).	9
Figura 5 – Torres de refrigeração.	12
Figura 6 – Condensador (Foto tirada em 12/7/2012).	13
Figura 7 – Turbina de alta pressão (Foto tirada em 12/7/2012).	14
Figura 8 – Turbina de média pressão (Foto tirada em 12/7/2012).	15
Figura 9 – Turbinas de baixa pressão (Foto tirada em 12/7/2012).	16
Figura 10 – Esquema geral do processo de desnitrificação.	22
Figura 11 – Esquema geral do processo de dessulfuração.	24
Figura 12 – Variação das emissões de NO _x na Central entre 2007 e 2011.	30
Figura 13 – Variação das emissões de SO ₂ na Central entre 2007 e 2011.	30
Figura 14 – Variação das emissões de partículas na Central entre 2007 e 2011.	31
Figura 15 – Diagrama de extremos e quartis para a variável “pH da pasta de gesso”, nos dois absorvedores da instalação FGD.	42
Figura 16 – Diagrama de extremos e quartis para a “densidade da pasta de gesso” nos dois absorvedores da instalação FGD.	45
Figura 17 – Diagrama de extremos e quartis para a “% de humidade do gesso” correspondente aos dois absorvedores da instalação de FGD.	48
Figura 18 – Carta para o “pH da pasta de gesso”, no absorvedor 1.	60
Figura 19 – Carta para o “pH da pasta de gesso”, no absorvedor 2.	60
Figura 20 – Carta de controlo de qualidade para a média da “densidade da pasta de gesso”, no absorvedor 1.	62
Figura 21 – Carta de controlo de qualidade para a média da “densidade da pasta de gesso”, no absorvedor 2.	62
Figura 22 – Carta de Controlo de qualidade para a média da “% de humidade do gesso” correspondente ao absorvedor 1.	64
Figura 23 – Carta de controlo de qualidade para a média da “% de humidade do gesso” correspondente ao absorvedor 2.	64

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Valores máximos de emissão de SO ₂ , NO _x e partículas.....	20
Tabela 2 – Valores máximos atingíveis com o investimento realizado na Central Termoelectrica do Pego.....	20
Tabela 3 – Grandes áreas de actividade do Laboratório Químico.	34
Tabela 4 – Valores de referência para a densidade e % de sólidos do leite de cal.....	35
Tabela 5 – Valores de referência para a densidade, pH e % de sólidos da pasta de gesso.	35
Tabela 6 – Valores de referência para a % de humidade, grau de pureza, % carbonatos, sulfitos e teor de cloretos do gesso.	36
Tabela 7 – Estatísticas descritivas para o “pH da pasta de gesso”, nos dois absorvedores da instalação FGD.	41
Tabela 8 – Estatísticas descritivas para a “densidade da pasta de gesso” (g.cm ⁻³) nos dois absorvedores da instalação FGD.	44
Tabela 9 – Estatísticas descritivas para a “% de humidade do gesso” correspondente aos dois absorvedores da instalação FGD.	47
Tabela 10 – Resultados do Teste à normalidade para a variável “pH da pasta de gesso”. .	51
Tabela 11 – Resultados dos Testes de <i>Levene</i> (testa a homogeneidade das variâncias) e <i>t – Student</i> (para comparar médias populacionais), respectivamente.....	52
Tabela 12 – Resultados do Teste à normalidade para a variável “densidade da pasta de gesso”.	53
Tabela 13 – Resultados dos Testes de <i>Levene</i> (testa a homogeneidade das variâncias) e <i>t – Student</i> (para comparar médias populacionais), respectivamente.....	54
Tabela 14 – Resultados do Teste à normalidade para a variável “% de humidade do gesso”.	55
Tabela 15 – Resultados dos Testes de <i>Levene</i> (testa a homogeneidade das variâncias) e <i>t – Student</i> (para comparar médias populacionais), respectivamente.....	56
Tabela 16 – Limites a 95% e 99% para o “pH da pasta de gesso”.....	59
Tabela 17 – Intervalos de Confiança a 95% e 99% para a média da “densidade da pasta de gesso”.	61
Tabela 18 – Intervalos de Confiança a 95% e a 99% para a “% de humidade do gesso”...	63

Lista de abreviaturas e siglas

AP – Pré-aquecedores	LQCTP – Laboratório Químico da
CCGT – <i>Combined Cycle Gas Turbine</i>	Central Termoelétrica do Pego
CV (%) – Coeficiente de variação (em percentagem)	LSC – Limite Superior de Controlo
EPRI – <i>Electric Power Research Institute</i>	LSR – Limite Superior de Referência
FGD – <i>Flue Gas Desulphurization</i>	SCR – <i>Selective Catalytic Reduction</i>
GGV – Grupo Gerador de Vapor	Sig. – Significância
GTA – Grupo Turbina-Alternador	SIR – Sistemas Rectificadores Integrados
H_0 – Hipótese nula	TAP – Turbina de Alta Pressão
H_1 – Hipótese alternativa	TBP – Turbina de Baixa Pressão
IC – Intervalo de Confiança	<i>Teste K-S – Teste de Kolmogorov – Smirnov</i>
ITA – Instalação de Tratamento de Águas	TLC – Teorema do Limite Central
LC – Linha Central	TMP – Turbina de Média Pressão
LIA – Limite Inferior de Aviso	REN – Rede Eléctrica Nacional
LSA – Limite Superior de Aviso	VLE – Valores Limite de Emissão
LIC – Limite Inferior de Controlo	V.O. – Valor Óptimo
LIR – Limite Inferior de Referência	

Lista de Símbolos

CaCO_3 – Carbonato de cálcio

CaSO_4 – Sulfato de cálcio

CO_2 – Dióxido de carbono

H_2O – Água

NO_x – Óxidos de Azoto

NH_3 – Amoníaco

N_2 – Azoto

SO_2 – Dióxido de Enxofre

n – Dimensão da amostra

μ – Média populacional

σ – Desvio-Padrão populacional (e σ^2 – Variância populacional)

α – Nível de significância (e $1 - \alpha$ – Grau de confiança)

Introdução

Este trabalho insere-se no estágio curricular realizado na Central Termoelétrica do Pego, mais concretamente no Laboratório Químico, local onde foram recolhidos dados relativos ao controlo do processo de dessulfuração (FGD – *Flue Gas Desulphurization*) dos gases de combustão.

A produção de energia eléctrica através da combustão de combustíveis fósseis, como por exemplo o carvão, implica a emissão de efluentes gasosos potencialmente nocivos para o Ambiente e ecossistemas terrestres. Dos efluentes gasosos que são emitidos podem-se destacar o dióxido de enxofre (SO_2), que pode originar as chuvas ácidas; os óxidos de azoto (NO_x), que contribuem para deposições ácidas e fenómenos de nevoeiro fotoquímico; o dióxido de carbono (CO_2), que é um dos gases responsável pelo aquecimento global da Terra; e a emissão de partículas, com potencial nocivo para a saúde [1].

No entanto, a existência de uma crescente preocupação com o Ambiente e o aparecimento de restrições legais mais rigorosas, no que respeita aos valores limite de emissão (VLE) dos efluentes gasosos já referidos, levaram principalmente as grandes Centrais de combustão a desenvolver técnicas, ou processos, que permitissem reduzir os teores de NO_x , SO_2 e partículas dos gases de combustão por estas produzidas.

Na Central Termoelétrica do Pego os processos utilizados para a redução dos teores de NO_x e SO_2 dos gases de combustão são a desnitrificação (SCR – *Selective Catalytic Reduction*) e a dessulfuração (FGD – *Flue Gas Desulphurization*), respectivamente. A redução de partículas foi melhorada pela modificação do sistema de controlo dos precipitadores electrostáticos.

O presente estudo debruçou-se mais sobre o processo de dessulfuração. Este tem como objectivo a redução do teor de SO_2 dos gases de combustão. A remoção do SO_2 ocorre pela sua reacção, no absorvedor, com uma suspensão de calcário (CaCO_3) que é injectada nos chuveiros existentes na parte superior deste equipamento. Com a injeção de ar na parte inferior do absorvedor é então favorecida a produção de gesso, que pode ser posteriormente comercializado se cumprir as especificações exigidas.

Os objectivos do estudo realizado são os seguintes: analisar o comportamento de variáveis importantes no processo (“pH” e “densidade da pasta de gesso”; e “% humidade do gesso”); realizar um estudo comparativo das variáveis, nos dois absorvedores da instalação, identificando se existem diferenças significativas, nestes dois equipamentos¹.

Precedidos pela Introdução, este Relatório foi estruturado de acordo com os seguintes Capítulos:

No Capítulo 1 faz-se a apresentação geral da Central Termoeléctrica do Pego, no Capítulo 2 descreve-se o funcionamento da Central na produção de energia eléctrica, desde a chegada do carvão a esta, até à transformação da energia mecânica em eléctrica no gerador. O Capítulo 3 é dedicado às emissões de efluentes gasosos resultantes da combustão do carvão, explicando ainda os processos utilizados na redução e controlo destas emissões. O Relatório continua com o Capítulo 4 que aborda a variação das emissões de NO_x, SO₂ e partículas da Central, antes e após a entrada em funcionamento dos sistemas de tratamento de gases. No Capítulo 5 é apresentado o Laboratório Químico da Central Termoeléctrica do Pego, as suas responsabilidades e grandes áreas de actividade. São ainda explicados os parâmetros controlados no processo de dessulfuração, bem como a descrição dos métodos de ensaio utilizados para a determinação das variáveis estudadas estatisticamente. O Capítulo 6 contém a análise estatística das variáveis em estudo (“pH” e “densidade da pasta de gesso”; e “% de humidade do gesso”), onde foram calculadas medidas de estatística descritiva univariada e construídos diagramas de extremos-e-quartis, que permitem visualizar o comportamento das variáveis. Foi também realizado um estudo estatístico inferencial com o objectivo de analisar eventuais diferenças, estatisticamente significativas, ao nível dos dois absorvedores da instalação de dessulfuração, e foram ainda construídos Intervalos de Confiança e Cartas de Controlo de qualidade, para cada variável. Finalmente, no Capítulo 7 são apresentadas algumas considerações finais.

¹ Os dados obtidos resultaram das análises realizadas, no Laboratório Químico da Central Termoeléctrica do Pego, a diversos parâmetros de operação do processo de dessulfuração.
Na análise estatística dos dados foi utilizado o *software* SPSS (Statistical Package for Social Sciences) versão 19.

1. Central Termoeléctrica do Pego

1.1. Apresentação da Central

A Central Termoeléctrica do Pego localiza-se nas freguesias do Pego e Concavada, conselho de Abrantes, tendo uma potência eléctrica instalada de 628 MW. A sua construção ocorreu entre Novembro de 1989, que coincidiu com o início da montagem do primeiro Grupo Gerador de Vapor (GGV), cuja actividade industrial teve início em Março de 1993, e Outubro de 1995, data da entrada em serviço do segundo Grupo da Central.

A Central foi adquirida, em Novembro de 1993, à EDP – Energias de Portugal S.A. pela Tejo Energia – Produção e distribuição de Energia Eléctrica, S.A. Esta é um consórcio de que fazem parte a *International Power* de Inglaterra, que detém 50% da empresa, a Espanhola *Endesa Generacion* com 39% e a EDP com 11% do capital.

Nesta data, a *Endesa* e a *International Power* constituíram simultaneamente, cada uma com quota de 50%, as empresas Pegop – Energia Eléctrica S.A., que assegura a operação e manutenção da Central, e a CarboPego – Abastecimento de Combustíveis S.A., que assegura a compra do carvão no mercado internacional e a sua logística até à entrega na Central do Pego.

Tendo em consideração o ambiente e a necessidade de cumprir as obrigações legais no que diz respeito às emissões de poluentes gasosos para a atmosfera, foram construídas na Central do Pego as instalações de desnitrificação (SCR - *Selective Catalytic Reduction*) e de dessulfuração (FGD - *Flue Gas Desulphurization*), que têm como objectivo, respectivamente, a redução dos teores de NO_x e SO₂ dos gases libertados para a atmosfera pela Central. A construção destas instalações ocorreu entre 2005 e 2007, com entrada em funcionamento no ano de 2008 [2].

Numa área adjacente à Central a carvão foram construídos os dois Grupos de ciclo combinado a gás natural (CCGT – *Combined Cycle Gas Turbine*), começando estes a funcionar em 2010 e apresentando cada um uma potência instalada de cerca de 400 MW.

2. Funcionamento da Central

O combustível utilizado na Central Termoeléctrica do Pego é o carvão mineral, sendo este importado maioritariamente de países como a Colômbia e África do Sul. No entanto, outros combustíveis como o fuelóleo, gasóleo e propano, são utilizados respectivamente, nas situações de arranque e estabilização da combustão, nos grupos diesel de emergência e bombas diesel do sistema de extinção de incêndio e na necessidade de acendimento dos queimadores das caldeiras, embora em quantidades mais reduzidas.

O processo industrial da Central Termoeléctrica do Pego, pode ser separado em dois grandes sistemas: o Grupo Gerador de Vapor (GGV), onde são produzidas cerca de 950 toneladas de vapor, por hora, na totalidade da carga e o Grupo Turbina – Alternador (GTA), que transforma a energia mecânica obtida pela passagem do vapor nas turbinas em energia eléctrica, que irá ser fornecida à Rede Eléctrica Nacional (REN) para distribuição aos consumidores.

Cada Grupo da Central, na carga máxima, tem a capacidade de queimar na caldeira cerca de 108 toneladas/hora de carvão pulverizado, produzindo aproximadamente 950 toneladas de vapor, a 535°C e 167 bar. Após a expansão do vapor nas turbinas, este passa pelo condensador, para ser transformado, por condensação, novamente em água no estado líquido, que vai ser enviada para a caldeira para o reinício do ciclo.

A água utilizada na Central provém do rio Tejo, passando por um sistema de tratamentos com vista a ter as propriedades necessárias ao bom funcionamento de todos os equipamentos que a utilizam.

Da combustão do carvão resultam gases, estes são encaminhados para a instalação de desnitrificação (SCR), para redução dos teores de NO_x , passam pelos precipitadores electrostáticos, onde são removidas as cinzas volantes, e pela instalação de dessulfuração (FGD), para redução do teor de SO_2 . Por fim os gases tratados são lançados para a atmosfera pela chaminé que tem uma altura de 225 metros [2].

Os valores destas emissões são monitorizados em contínuo por analisadores na chaminé, situados a uma altura de 87,2 metros. Na área circundante à Central, existem seis estações de medição da qualidade do ar, que controlam os níveis de emissões permitidos por lei.

As cinzas volantes produzidas durante o processo e que apresentem especificação comercial são vendidas para a indústria betoneira, quando tal não acontece, são depositadas no aterro de resíduos da Central, como acontece com as escórias.

Na Figura 1 está representado, esquematicamente, o diagrama geral do processo de produção de energia eléctrica na Central Termoelétrica do Pego.

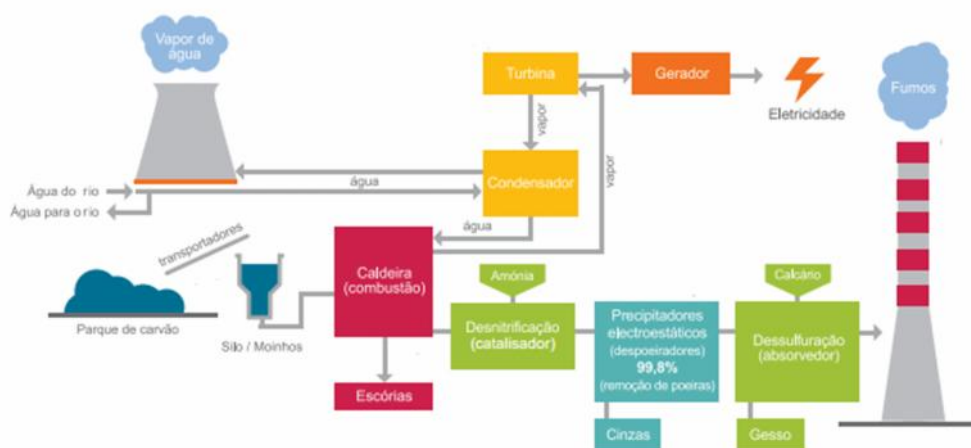


Figura 1 – Esquema geral do processo de produção de energia eléctrica na Central Termoelétrica do Pego [3].

Para o processo de produção de electricidade na Central é importante destacar as seguintes áreas: transporte do carvão, sistema de ar e queimadores, água utilizada no processo, circuito de água de alimentação, circuito de água de refrigeração, condensador e turbinas.

2.1. Transporte do Carvão

O carvão, importado, chega ao porto de Sines em navios de grande tonelagem, sendo posteriormente transportado por via-férrea para a Central Termoeléctrica do Pego, onde vai ser armazenado no parque de carvão em duas pilhas:

- Pilha activa – Está em transformação permanentemente, podendo ter mais ou menos carvão, ou seja, a sua quantidade depende do balanço entre as necessidades dos Grupos e a chegada do carvão;
- Pilha passiva – Serve como reserva de combustível, tendo a capacidade de fornecer carvão entre trinta a quarenta dias, em situações de anomalia da entrega diária deste.

Para evitar a auto-combustão do carvão na pilha passiva, esta deverá ser cuidadosamente compactada. O carvão da pilha activa tem prioridade para utilização no processo, uma vez que o carvão começa a perder a suas características quando armazenado, sendo importante consumir imediatamente o combustível que vai chegando à Central todos os dias.

O transporte do carvão do parque para os Grupos é efectuado por dois tapetes transportadores cobertos, cada um com um comprimento de 100 metros e capacidade para fornecer cerca de 1500 toneladas de carvão por hora, como mostra a Figura 2.

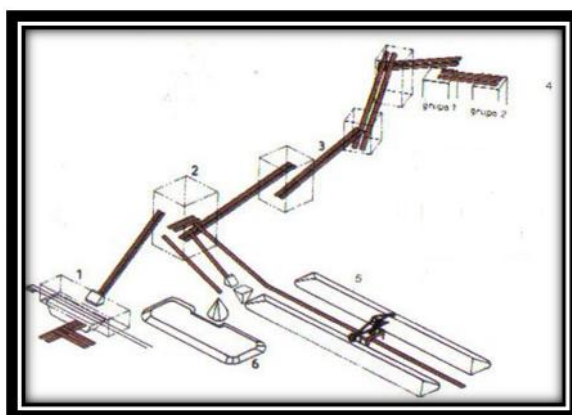


Figura 2 – Transporte do carvão para os Grupos da Central [2].

Legenda: 1- Descarga ferroviária; 2- Torre de transferência; 3- Tapetes transportadores; 4- Silos de carvão; 5- Pilhas activas; 6- Pilha passiva

Cada Grupo é constituído por quatro moinhos de carvão (Figura 3), que são alimentados por quatro alimentadores de carvão e pelo mesmo número de silos, cada um destes com uma capacidade de armazenamento de 400 toneladas deste combustível.

O carvão contido nos silos, antes de ser queimado, passa pelos alimentadores de carvão, que têm como função dosearem a quantidade de combustível que vai alimentar os moinhos. Nestes o carvão é seco e reduzido a pó fino com uma granulometria de aproximadamente 0,09 mm com vista a assegurar a sua queima completa na câmara de combustão da caldeira.

Factores como a pulverização e mistura do carvão com o ar primário são muito importantes na combustão, determinando a velocidade de ignição, o comprimento da chama na caldeira e a emissão de gases para a atmosfera. Assim uma moagem do carvão que possibilite uma menor granulometria deste, contribui para redução da emissão de poluentes gasosos [2].

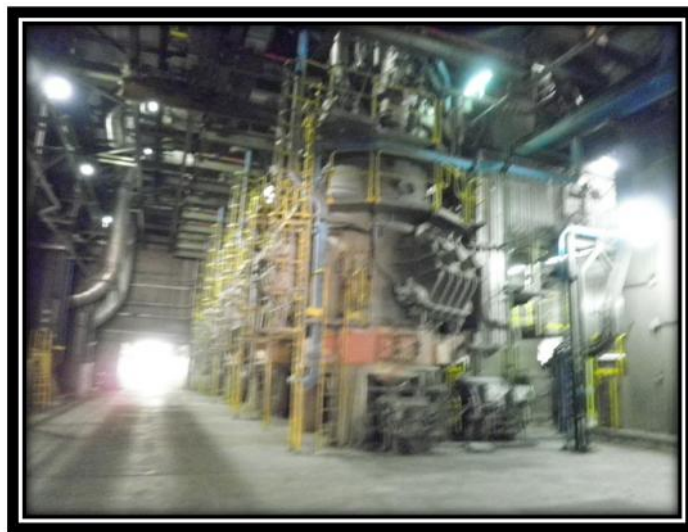


Figura 3 – Moinhos de carvão (Foto tirada em 12/7/2012).

2.2. Sistema de ar e queimadores

Para a combustão do carvão se realizar, é necessária a presença de combustível e ar, sendo que neste processo existem três tipos de ar: o ar primário, que transporta as partículas do carvão; o ar secundário, que assegura a quantidade de ar necessário à combustão; e o ar de arrefecimento e ignição, para iniciar um arranque a frio.

O ar primário tem como principal função a secagem do carvão nos moinhos e o seu transporte até aos queimadores, sendo apenas utilizado desde que se começa a utilizar como combustível o carvão. O aquecimento deste é efectuado ao nível dos aquecedores de ar regenerativo, pelo aproveitamento dos fumos que vêm da câmara de combustão.

O ar secundário advém da recolha de ar feita no topo da caldeira, por uma conduta de grandes dimensões, tendo como função assegurar o ar necessário à câmara de combustão para que a reacção ocorra em boas condições.

No que diz respeito ao ar de arrefecimento e ignição, este é responsável pelo desencadeamento da reacção de combustão num arranque a frio, ou seja, quando um Grupo se encontra parado há mais de 36 horas. Este tipo de ar tem ainda a função de arrefecer a zona envolvente dos queimadores.

Os queimadores (Figura 4) são equipamentos que fazem parte do sistema principal da queima, tendo como objectivo ejectar e queimar a mistura ar-combustível na câmara de combustão da caldeira. Estes são regulados de modo a que a combustão se realize o mais dentro possível da câmara de combustão, aumentando assim a eficiência desta [2].



Figura 4 – Queimadores (Foto tirada em 12/7/201).

2.3. Água utilizada no processo

Toda a água utilizada na Central é proveniente do Rio Tejo, de onde é extraída por quatro bombas situadas numa torre de captação, esta pode recolhe-la a três cotas diferentes, de acordo com o nível do rio. A água vai sendo bombeada e sofrendo sucessivas filtrações, passando por grelhas que evitam a entrada de objectos que poderiam prejudicar o sistema.

Depois do processo de filtração, a água é armazenada no reservatório de água industrial, com uma capacidade de 16 500 m³, tendo a função de fornecer água aos vários sistemas da Central, ou seja, à Instalação de Tratamento de Águas (ITA), ao sistema de combate a incêndios, sistema de refrigeração do condensador, sistema de utilização doméstica, edifício técnico-administrativo, além de toda a água utilizada na rega das pilhas de carvão e cinzas, com o objectivo de evitar a dispersão de poeiras.

Depois de convenientemente tratada a água pode seguir vários caminhos, sendo utilizada em diferentes circuitos no processo de produção da Central, como o circuito de água de alimentação, que tem a função de recircular a água necessária à caldeira para produção de vapor; circuito de água de refrigeração, que tem a função de arrefecer o condensador principal; e também o circuito de condensados, que faz a recolha, impulsão e aquecimento da água, desde o *hotwell*, ou pote de condensados do condensador principal, até ao tanque de alimentação.

2.3.1. Circuito de água de alimentação

O circuito de água de alimentação tem o objectivo de fornecer à caldeira a quantidade de água necessária para a produção de vapor, este circuito tem início no tanque de alimentação e vai até à entrada do economizador, na caldeira.

Com capacidade de armazenar um volume de água de 210 m³ à cota de 40 metros, o tanque de água de alimentação tem a função de efectuar o aquecimento da água, para a fornecer à caldeira nas condições adequadas para o processo. Neste reservatório, a água proveniente do circuito dos condensados com uma temperatura de, aproximadamente,

153°C, continua a ser aquecida devido à troca de calor entre uma extracção de vapor sobreaquecido, passando assim para os 186°C.

Na parte superior do tanque de água de alimentação encontram-se dois desgaseificadores, estes têm a função de remover os gases não condensáveis que se encontram na água para a atmosfera, de maneira que a entrada da água no gerador de vapor se faça em segurança. A água depois de desgaseificada é encaminhada para a bomba de água de alimentação, que a irá impulsionar até ao barrilete, situado no topo da caldeira, tendo passado anteriormente por dois pré-aquecedores de alta pressão e pelos economizadores inferior e superior.

Os pré-aquecedores de alta pressão têm a função de continuar com o aquecimento da água, que vem sendo efectuado desde o *hotwell* no circuito dos condensados. Este aquecimento ocorre através da troca de calor, em contra-corrente, entre a água e uma extracção de vapor seco.

Na sexta e penúltima extracção de vapor seco, sexto pré-aquecedor (AP6), efectuada na turbina de média pressão, a temperatura da água aumenta de 190°C para os 228°C. A última extracção de vapor sobreaquecido, AP7, realizada na turbina de alta pressão, faz aumentar a temperatura da água de 228°C para os 257°C, entrando esta de seguida no economizador.

Os condensados que se formam nos pré-aquecedores de alta pressão, são armazenados no pote de condensados do pré-aquecedor AP6, sendo posteriormente enviados para o tanque de alimentação.

Quando ocorre a ultrapassagem dos níveis de regulação dos condensados dos pré-aquecedores AP6 e AP7, os condensados em excesso são enviados directamente para o condensador. Se o nível de regulação destes pré-aquecedores for muito elevado, as extracções 6 e 7 são fechadas, procedendo-se ao envio do excesso de condensados para o condensador e por fim o encaminhamento da água de alimentação directamente das bombas de alimentação para o economizador [2].

2.3.2. Circuito de água de refrigeração

A água de refrigeração circula entre o condensador e a torre de refrigeração (Figura 5), esta é introduzida neste circuito pela bacia da torre de refrigeração tendo como função receber o calor resultante da condensação do vapor, no condensador principal.

Por contacto com o ar atmosférico, o calor recebido é libertado na torre de refrigeração, sendo uma parte da água libertada pelo ar ascendente, formando assim uma nuvem de vapor no cimo da torre.

Para além da refrigeração do condensador, a água que entra na bacia das torres de refrigeração tem ainda o objectivo de efectuar o arrefecimento de outros pequenos circuitos de refrigeração [2].



Figura 5 – Torres de refrigeração.

2.4. Condensador

Sendo um permutador de calor por superfície, o condensador (Figura 6) está instalado debaixo da turbina de baixa pressão, perpendicularmente ao seu eixo. A sua estrutura é suportada por intermédio de molas, que além de atenuarem determinados esforços transmitidos à turbina, permitem ainda a sua dilatação.

O condensador é constituído por tubos rectilíneos agrupados em módulos que se repetem, formando um feixe tubular por onde circula a água de arrefecimento. Este feixe está envolvido pela câmara de condensação, fechada nos topos pelas placas tubulares que estão acopladas às câmaras de água, ou seja, estruturas através das quais se processa a alimentação e remoção de água de arrefecimento.

O feixe tubular é constituído por cerca de 16 000 tubos com uma espessura de 1 mm e um diâmetro exterior de 19 a 22 mm. As suas extremidades são fixas às respectivas placas tubulares, sendo esta a estrutura por onde circula a água de refrigeração fazendo assim com que o vapor proveniente da turbina condense sobre a superfície exterior, sem a ocorrência da mistura de fluidos. Seguidamente, os condensados são enviados para o pote de condensados, ou *hotwell*, para introdução no circuito de água de alimentação [2].



Figura 6 – Condensador (Foto tirada em 12/7/2012).

2.5. Turbinas

Na Central cada Grupo é constituído por quatro turbinas: uma de alta pressão, uma de média pressão e duas de baixa pressão. Todas estão colocadas sobre o mesmo veio, a que está associado um alternador que converte a energia mecânica em energia eléctrica. Esta é produzida a 18 kV, sendo depois transformada em 400 kV, por um transformador principal com uma potência de 340 MVA.

2.5.1. Turbina de alta pressão

A turbina de alta pressão (TAP), Figura 7, é do tipo acção-reacção e de fluxo simples, ou seja, o vapor expande-se ao longo desta num único sentido, produzindo energia mecânica pelas expansões de vapor sobreaquecido ao longo das suas pás, fixas e móveis.



Figura 7 – Turbina de alta pressão (Foto tirada em 12/7/2012).

O vapor sobreaquecido dá entrada na turbina por intermédio de quatro válvulas reguladoras, que se encontram opostas duas a duas para o equilíbrio desta, para uma zona denominada por câmara de acção. Desta, o vapor sobreaquecido com umas condições de temperatura e pressão, respectivamente de 530°C e 162 bar, passa por uma roda de impulso

que o uniformiza e envia para as pás da turbina, expandindo-se adiabaticamente e numa direcção paralela ao eixo, num caudal de 950 ton/h.

A dimensão das pás aumenta ao longo da turbina em resposta à perda de pressão que o vapor sobreaquecido vai sofrendo. Este depois de expandido sai pela parte inferior da turbina, com uma perda significativa de pressão (-118 bar) e temperatura (-181°C), sendo enviado por duas linhas para o reaquecedor.

É possível verificar-se um desfasamento do caudal de vapor entre a entrada e a saída na turbina, uma vez que este é utilizado para fazer o ultimo pré-aquecimento, no pré-aquecedor AP7, como referido anteriormente.

2.5.2. Turbina de média pressão

A turbina de média pressão (TMP), Figura 8, é do tipo acção e fluxo simples, apresentando dimensões superiores relativamente à TAP, devido à perda de pressão do vapor que ocorreu na primeira expansão.



Figura 8 – Turbina de média pressão (Foto tirada em 12/7/2012).

Antes de entrar nesta turbina, o vapor vai sofrer, isobaricamente, um aumento de temperatura no reaquecedor, passando esta de 349°C para 530°C à pressão de 44 bar. O vapor reaquecido sai do reaquecedor, por uma linha de vapor, entrando posteriormente na TMP com um caudal de 861 ton/h.

Há uma grande diminuição do caudal de vapor entre a saída e a entrada da TMP, devido às extracções de vapor realizadas para o pré-aquecimento da água de alimentação por um pré-aquecedor de baixa pressão, pelo pré-aquecedor AP6 e também pelo tanque de água de alimentação.

Após expansão nesta turbina, o vapor a 246°C e 5 bar, sai pela parte superior, em duas linhas, para entrar nas turbinas de baixa pressão (TBP).

2.5.3. Turbinas de baixa pressão

As duas turbinas de baixa pressão (TBP), Figura 9, são do tipo acção e duplo fluxo, ou seja, a expansão de vapor acontece em sentidos opostos no seu interior. Estas são as que apresentam maiores dimensões, uma vez que o vapor que por elas passa tem uma pressão muito inferior à verificada nas TAP e TMP, pelas sucessivas expansões a que foi sujeito.



Figura 9 – Turbinas de baixa pressão (Foto tirada em 12/7/2012).

O vapor, depois de expandido nas TBP, é encaminhado para o condensador, que o vai condensar para fornecer água de alimentação à caldeira e reiniciar um novo ciclo.

O caudal de vapor à saída das TBP é muito inferior ao da entrada, uma vez que ao longo destas foram efectuadas extracções de vapor para o aquecimento da água de alimentação, ao nível dos pré-aquecedores de baixa pressão [2].

3. Emissões de efluentes gasosos da Central

A combustão do carvão na Central origina a emissão de gases e partículas nefastos para os ecossistemas terrestres, entre eles podem-se destacar o dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de azoto (NO_x), cinzas volantes e dióxido de carbono (CO₂).

Para diminuir os impactes ambientais negativos decorrentes principalmente das emissões de NO_x, e SO₂ é fundamental a redução dos teores destes compostos nos gases de combustão que são lançados para a atmosfera. Para tal no ano de 2008 entraram em funcionamento na Central Termoelétrica do Pego as instalações de desnitrificação (SCR - *Selective Catalytic Reduction*) e de dessulfuração (FGD - *Flue Gas Desulphurization*), tecnologias de ponta que permitem a redução dos teores de NO_x e SO₂, respectivamente. Estes processos vão ser descritos nos subcapítulos seguintes, em particular, a dessulfuração dos gases de combustão, uma vez que foi nesta área que incidiu grande parte do estágio efectuado na Central.

3.1. Controlo das emissões de gases na Central

Com vista a diminuir os impactes ambientais negativos causados pela emissão de NO_x, SO₂ e partículas nos gases de combustão é determinante reduzir e controlar as emissões destes poluentes na Central Termoelétrica do Pego.

O Decreto-Lei nº 178/2003 de 5 de Agosto estabelece limitações às emissões para a atmosfera de certos poluentes provenientes de grandes instalações de combustão, transpondo para a ordem jurídica nacional a Directiva 2001/80/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro [4].

Assim, desde 1 de Janeiro de 2008 os limites de emissão medidos na chaminé da Central, por Grupo, no âmbito desta Directiva, ficaram estabelecidos aos seguintes valores máximos (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores máximos de emissão de SO₂, NO_x e partículas [2].

Tipos de Emissões	Valores máximos de emissão (mg.Nm ⁻³)	
	Janeiro 2008	Janeiro 2016
SO ₂	400	400
NO _x	500	200
Partículas	50	50

Com base no cumprimento desta Directiva, foram construídas na Central Termoelétrica do Pego, como referido anteriormente, as unidades de desnitrificação (SCR – *Selective Catalytic Reduction*) e de dessulfuração (FGD – *Flue Gas Desulphurization*), para a redução, respectivamente dos teores de NO_x e SO₂ dos gases emitidos para a atmosfera. Além destas instalações o funcionamento dos precipitadores electrostáticos foi melhorado com vista a aumentar o seu rendimento na redução da emissão de partículas.

A monitorização das emissões de NO_x e SO₂ é efectuada em contínuo por analisadores situados a uma altura de 87,2 metros, na chaminé, e em seis estações de medição na área circundante à Central, para controlo dos níveis de emissões permitidos por lei.

Com a implementação destas instalações e a melhoria do funcionamento dos precipitadores electrostáticos, os dois Grupos da Central estão em condições de funcionar abaixo dos limites de emissão aplicáveis até Janeiro de 2016 (Tabela 2).

Tabela 2 – Valores máximos atingíveis com o investimento realizado na Central Termoelétrica do Pego [2].

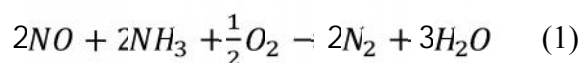
Tipos de emissões	Valores máximos atingíveis com o investimento efectuado (mg.Nm ⁻³)
SO ₂	200
NO _x	200
Partículas	20

Resumidamente, os gases resultantes da combustão do carvão passam, inicialmente, pela instalação de desnitrificação, em seguida pelos precipitadores electrostáticos, para remoção das partículas, e por fim pela instalação de dessulfuração, antes de serem emitidos pela chaminé da Central.

O funcionamento destes processos serão seguidamente apresentados pela sequência anteriormente referida.

3.1.1. Processo de desnitrificação

Para a redução dos teores de NO_x dos gases de combustão a tecnologia utilizada é a Redução Catalítica Selectiva (SCR). Esta fundamenta-se na redução dos óxidos de azoto (NO_x) a azoto puro (N_2) e vapor de água (H_2O), pela reacção do NO_x com amónia (NH_3) na presença de um catalisador, como mostra a equação (1).



Este processo realiza-se com a injeção de amónia a montante do sistema catalisador (Figura 10), através de um sistema de injectores, onde se obtém uma mistura homogénea com os gases de combustão. Após a injeção, os gases passam pelo reactor que contém o catalisador, constituído por compostos à base de dióxido de titânio e pentóxido de vanádio, obtendo-se uma redução do teor de NO_x na ordem dos 75%.

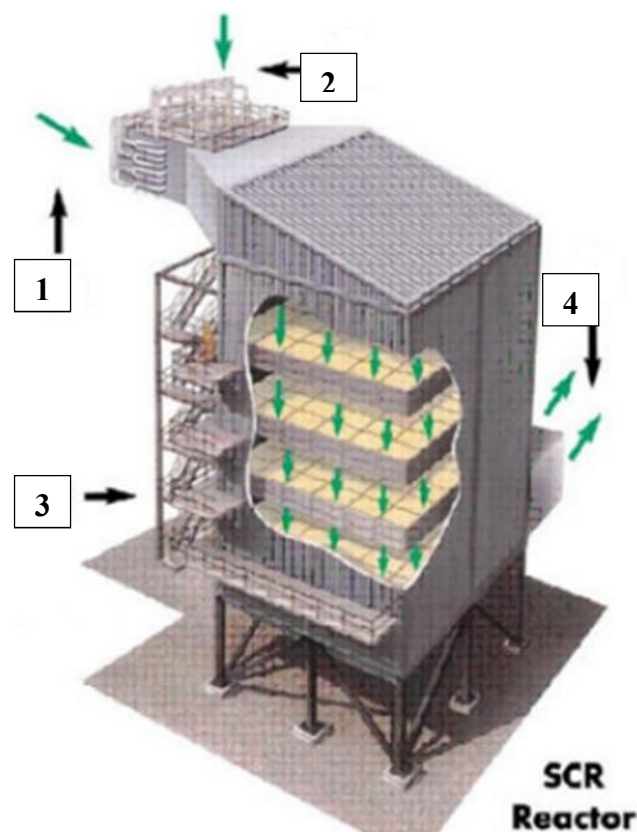


Figura 10 – Esquema geral do processo de desnitrificação [5].

Legenda das Correntes: 1- Entrada dos gases de combustão; 2- Injecção de amónia; 3- Reacção na presença de catalisador; 4- Saída dos produtos de reacção (N_2 e H_2O).

Após a redução do teor de NO_x dos gases de combustão no reator SCR, estes irão dar entrada no precipitador electrostático e posteriormente na Instalação de dessulfuração.

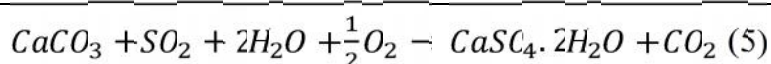
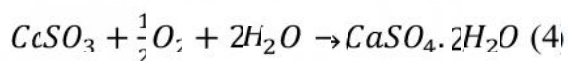
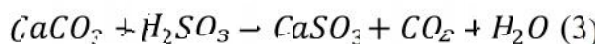
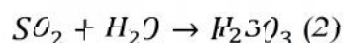
3.1.2. Partículas

A remoção de partículas é efectuada por precipitadores electrostáticos, no entanto houve uma modificação do seu sistema de controlo, através de Sistemas Rectificadores Integrados (SIR), após a elaboração de um estudo que visava identificar a melhor solução rendimento/custo. Com esta modificação a eficiência de funcionamento dos precipitadores melhorou consideravelmente possibilitando um rendimento de 99,8% para a remoção de cinzas volantes, bem como a obtenção de valores de partículas abaixo do seu valor limite de emissão que é de 50 mg.Nm^{-3} [2].

3.1.3. Processo de dessulfuração

O estudo do comportamento de variáveis importantes no processo de dessulfuração e a sua análise comparativa, no que diz respeito aos dois absorvedores da instalação FGD, foram alguns dos objectivos do estágio realizado, pelo que a descrição do modo de funcionamento deste processo vai ser mais aprofundada, comparativamente com o processo de desnitrificação.

A instalação FGD tem como principal objectivo a redução do teor de dióxido de enxofre (SO₂) dos gases de combustão da Central de forma a cumprir os valores limite de emissão estabelecidos pelo Decreto-Lei nº 178/2003 de 5 de Agosto. Basicamente, a remoção do SO₂ ocorre pela sua reacção, no absorvedor, com uma suspensão de calcário (CaCO₃) através de uma série de reacções parciais (absorção/neutralização/oxidação) que podem ser expressas pela seguinte reacção global [6]:



A instalação de dessulfuração é constituída por dois absorvedores, um por cada grupo da Central, por uma unidade de preparação e armazenagem do calcário, neste caso comum aos dois grupos e também por uma unidade de tratamento e armazenagem do gesso. Na Figura 11 está representada em detalhe o diagrama geral de funcionamento da instalação de FGD.

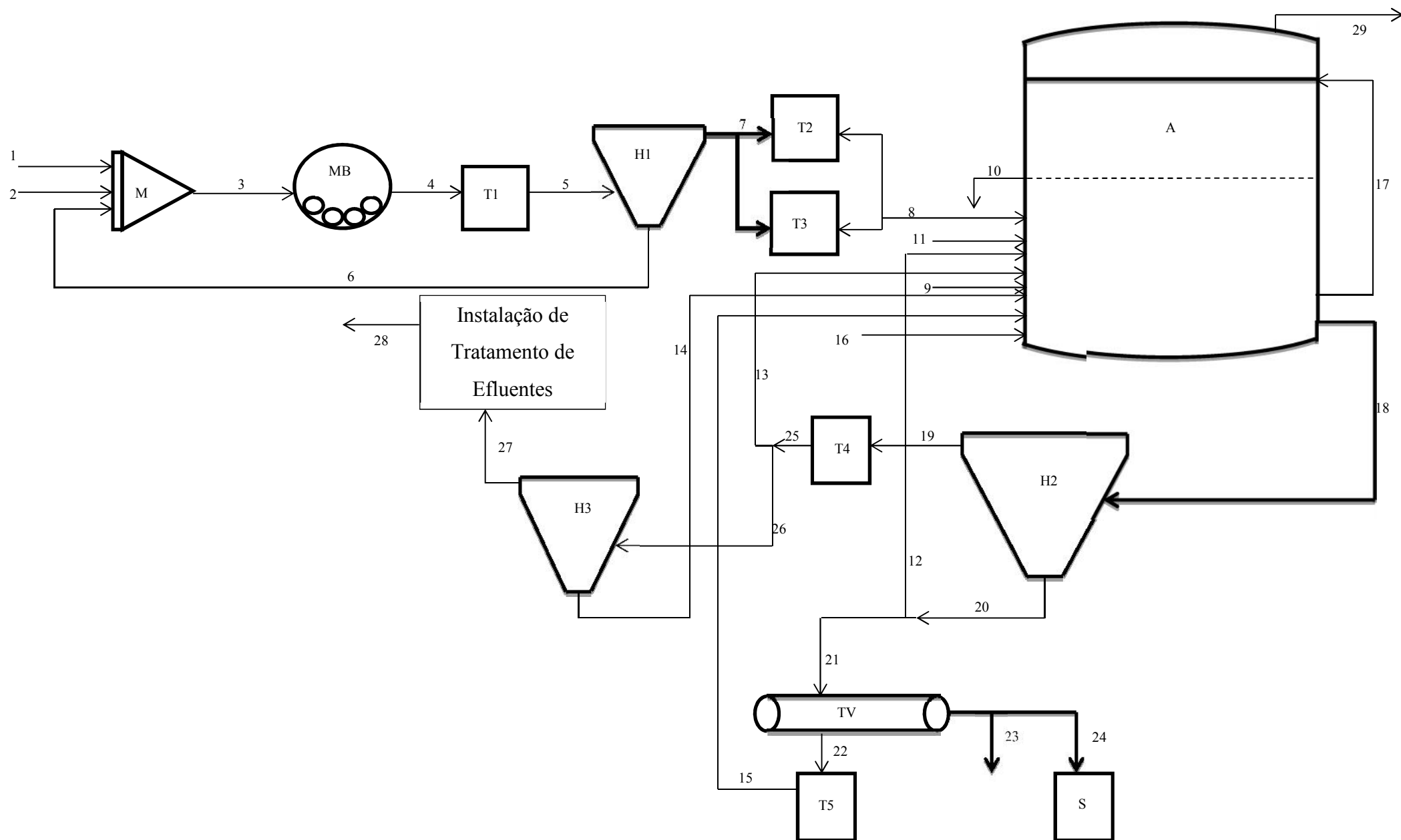


Figura 11 – Esquema geral do processo de dessulfuração [2].

Legenda das correntes e dos equipamentos representados na Figura 4:

Correntes: 1- água do processo; 2- calcário em pedra; 3- mistura de alimentação ao moinho de bolas; 4- *slurry* de calcário moída; 5- *slurry* de calcário homogeneizada que alimenta H1; 6- *slurry* de calcário rejeitado em H1; **7- *slurry* de calcário com especificação para o processo**; 8- alimentação da *slurry* de calcário ao absorvedor; 9- gases de combustão; 10- *overflow* devido ao nível do absorvedor ser ultrapassado; 11- água do processo; 12- recirculação do H2 para o absorvedor; 13- água do tanque de retorno que volta ao absorvedor; 14- sólidos resultantes do H3; 15- corrente de filtrado para o absorvedor; 16- ar oxidado; 17- recirculação da base do absorvedor para os chuveiros; **18- *slurry* de gesso do absorvedor que alimenta H2**; 19- *overflow* do H3 (rejeitado); 20- *underflow* do H2; 21- Sólidos de gesso para desidratação final; 22- filtrado do gesso; **23- gesso rejeitado (corrente de emergência)**; **24- gesso com especificação para armazenagem**; 25- água de retorno; 26- alimentação do H3; 27- efluente líquido para depuração; 28- efluente tratado (meio receptor); 29- gases tratados

Equipamentos: A- absorvedor; H1- hidrociclone de classificação; H2- hidrociclone de desidratação primária; H3- Hidrociclone secundário; M- misturador; MB- moinho de bolas; S- silo de gesso com especificação; T1- tanque do produto do moinho; T2 e T3- tanques de armazenamento da *slurry* com especificação; T4- tanque de água de retorno; T5- Tanque de recolha do filtrado; TV- tapete de vácuo

A primeira fase do processo de dessulfuração dos gases de combustão tem como objectivo a preparação do leite de cal que irá ser utilizado no processo. O calcário em pedra chega à instalação em camiões, sendo descarregado nas tremonhas e posteriormente armazenado em silos apropriados. Depois, antes de chegar ao moinho de bolas (MB) através dos tapetes transportadores, onde é triturado por um processo húmido, o calcário é misturado com a água do processo, no misturador (M). Forma-se assim uma pasta aquosa (*slurry*) de calcário que irá ser armazenada no tanque do produto do moinho (T1). Esta pasta, de seguida, irá alimentar o hidrociclone de calcário (H1), onde ocorre a separação das partículas de maior densidade e maior massa, das partículas de menor densidade e menor massa, que têm a corrente de saída respectivamente, na parte inferior (*underflow*) e na parte superior do hidrociclone (*overflow*). A corrente correspondente ao *underflow* vai

recircular para o misturador (M), pois nesta a *slurry* de calcário não apresenta especificação, enquanto que a corrente correspondente ao *overflow* vai alimentar os tanques de armazenamento da *slurry* com especificação (T2 e T3).

A segunda etapa do processo é onde se dá a reacção química ocorre ao nível do absorvedor (A). Neste os gases de combustão contendo dióxido de enxofre vão entrar em contacto, em contra-corrente, com a *slurry* de calcário que é injectada em chuveiros existentes na parte superior deste equipamento. O dióxido de enxofre vai reagir com o carbonato de cálcio, sendo favorecida a produção de sulfato de cálcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) pela injeção de oxigénio no absorvedor. A quantidade de pasta alcalina que é recirculada para o absorvedor por unidade de volume de gás a dessulfurizar é determinada por um parâmetro muito importante no processo, o rácio Líquido/Gás (L/G). Este rácio é normalmente expresso por fornecedores internacionais de FGD como 1 litro de pasta/1000 Nm^3 de gás de combustão e o seu valor resulta de uma medida de superfície de contacto gás/líquido durante a operação. Assim, quanto maior o valor desta relação, maior será a eficiência do processo, contudo, o consumo de reagente e energia também é superior [7].

Em seguida, os gases limpos irão sair pela parte superior do absorvedor, sendo reaquecidos por intermédio de um permutador de calor antes de serem finalmente enviados para a chaminé onde vão ser emitidos para a atmosfera.

A corrente de saída da parte inferior do absorvedor diz respeito à pasta de gesso nele produzido e que vai alimentar o hidrociclone de desidratação primária (H2). Neste a pasta é dividida numa corrente de matéria fina de baixa densidade (*overflow*) e numa corrente de cristais grosseiros de alta densidade (*underflow*). O *overflow* do hidrociclone primário corresponde à água de retorno que irá ser armazenada no tanque de água de retorno (T4). Posteriormente uma parte desta água irá voltar ao absorvedor e outra vai alimentar o hidrociclone secundário (H3). O *underflow* do hidrociclone primário corresponde à corrente de saída dos cristais de gesso que iram ser encaminhados para o tapete de vácuo (TV), onde ocorre a desidratação final. Isto acontece se a pasta de gesso que alimenta o hidrociclone primário cumprir os requisitos no que diz respeito aos valores limite de densidade ($1,11\text{-}1,13 \text{ g.cm}^{-3}$). Caso isto não se verifique, ou seja, se a densidade

não estiver dentro dos limites, o hidrociclone primário recirculará a pasta para o absorvedor (corrente 12).

A desidratação do gesso é a terceira etapa do processo, e ocorre nos tapetes de vácuo, que funcionam como um filtro, permitindo a passagem da água pelos seus poros e retendo a fase sólida. Após esta etapa o gesso é armazenado em silos até ser encaminhado para o destino final, enquanto a água do filtrado vai alimentar o absorvedor para reutilização no processo.

O gesso produzido, apresenta normalmente um grau de pureza bastante elevado, cerca de 96%, em média. Este é posteriormente, comercializado principalmente para a indústria cimenteira e para a produção de placas de gesso, contudo, para tal tem de cumprir com uma série de especificações, entre elas, a % de humidade assume grande importância, tendo de apresentar valores inferiores a 10%, caso contrário o gesso não cumpre a especificação e irá ser depositado em aterro apropriado [8].

A etapa final do processo de dessulfuração dos gases de combustão tem a ver com o tratamento dos efluentes líquidos resultantes principalmente da desidratação primária. O tratamento destes é realizado na instalação de tratamento de efluentes, onde são tratados de forma adequada de maneira a cumprir os valores limites de emissão para o sistema hídrico.

4. Variação das emissões de NO_x, SO₂ e partículas da Central

Este subcapítulo vai evidenciar a importância da observação do comportamento das emissões de NO_x, SO₂ e partículas (cinzas volantes) antes e após a entrada em funcionamento dos sistemas de tratamento de gases (SCR e FGD) e da modificação do sistema de controlo dos precipitadores electrostáticos, que melhorou a sua performance na remoção de partículas. Para tal foram utilizados dados relativos à emissão destes efluentes entre os anos de 2007 a 2011 (Anexo 1) para cada Grupo da Central.

Os gráficos seguintes (Figuras 12, 13 e 14) mostram a variação das emissões de NO_x, SO₂ e partículas na Central entre 2007 e 2011, sendo que para a sua elaboração foram utilizadas as médias mensais de emissão destes efluentes para os dois Grupos da Central. Importa ainda salientar que em Maio de 2008 os dois Grupos da Central se encontraram parados pelo que é possível verificar uma falha na linha de tendência correspondente a esta data em ambos os gráficos.

Pela análise das Figuras 12 e 13 verifica-se que a significativa redução das emissões de NO_x e SO₂ da Central está directamente relacionada com a entrada em funcionamento das unidades de desnitrificação e dessulfuração em Setembro de 2008. É também importante observar que nos anos posteriores à entrada em funcionamento destas instalações, as emissões destes poluentes para a atmosfera estão abaixo dos limites permitidos para este tipo de efluentes a partir de 2016, ou seja, 200 e 400 mg.Nm⁻³ para as emissões de NO_x e SO₂, respectivamente. Sendo que a emissão destes gases pela Central nunca ultrapassa os 200 mg.Nm⁻³.

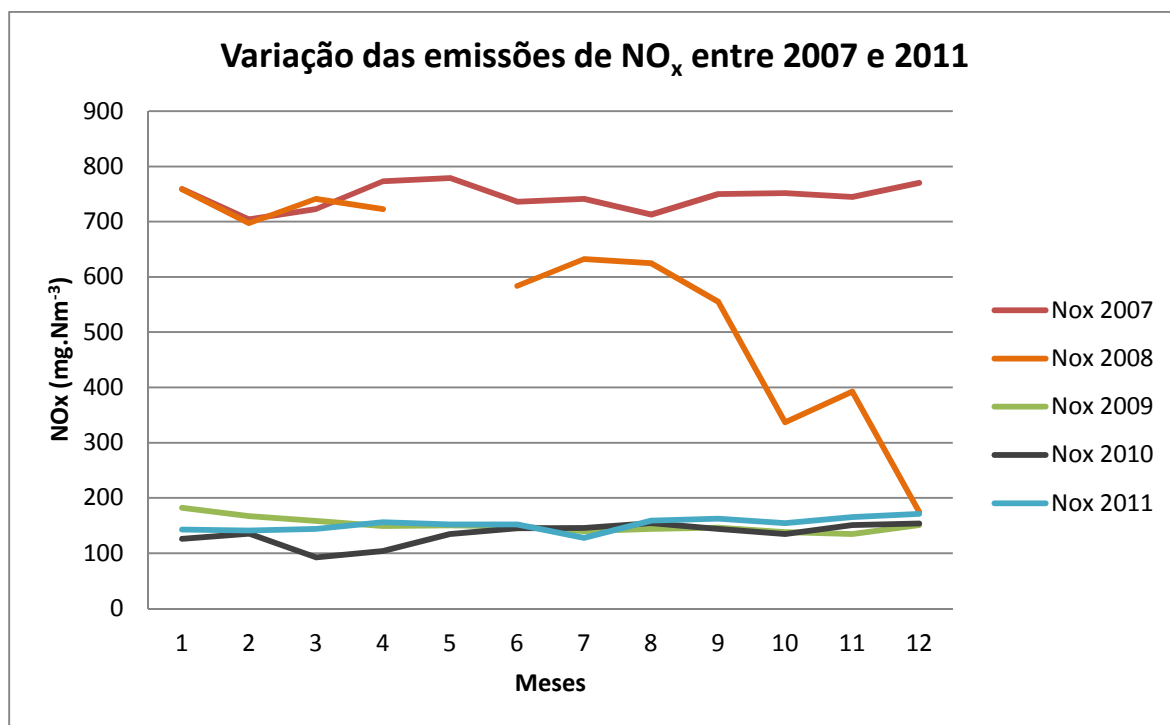


Figura 12 – Variação das emissões de NO_x na Central entre 2007 e 2011.

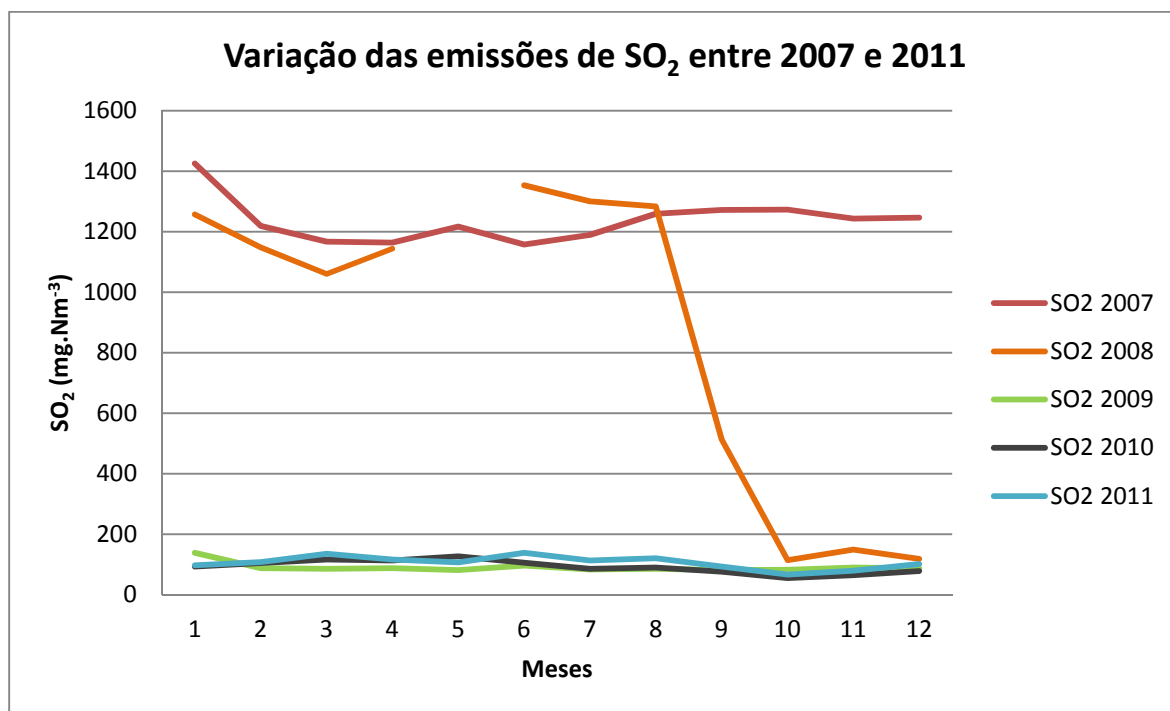


Figura 13 – Variação das emissões de SO₂ na Central entre 2007 e 2011.

A emissão de partículas também foi significativamente reduzida com a melhoria da eficiência dos precipitadores electrostáticos, como mostra a Figura 14, sendo possível observar que desde o final do ano de 2008, os valores das emissões de partículas na Central se encontram abaixo dos 10 mg.Nm⁻³, ou seja, bastante abaixo dos limites permitidos pela legislação a partir de 2016 que é de 50 mg.Nm⁻³ para este tipo de efluente.

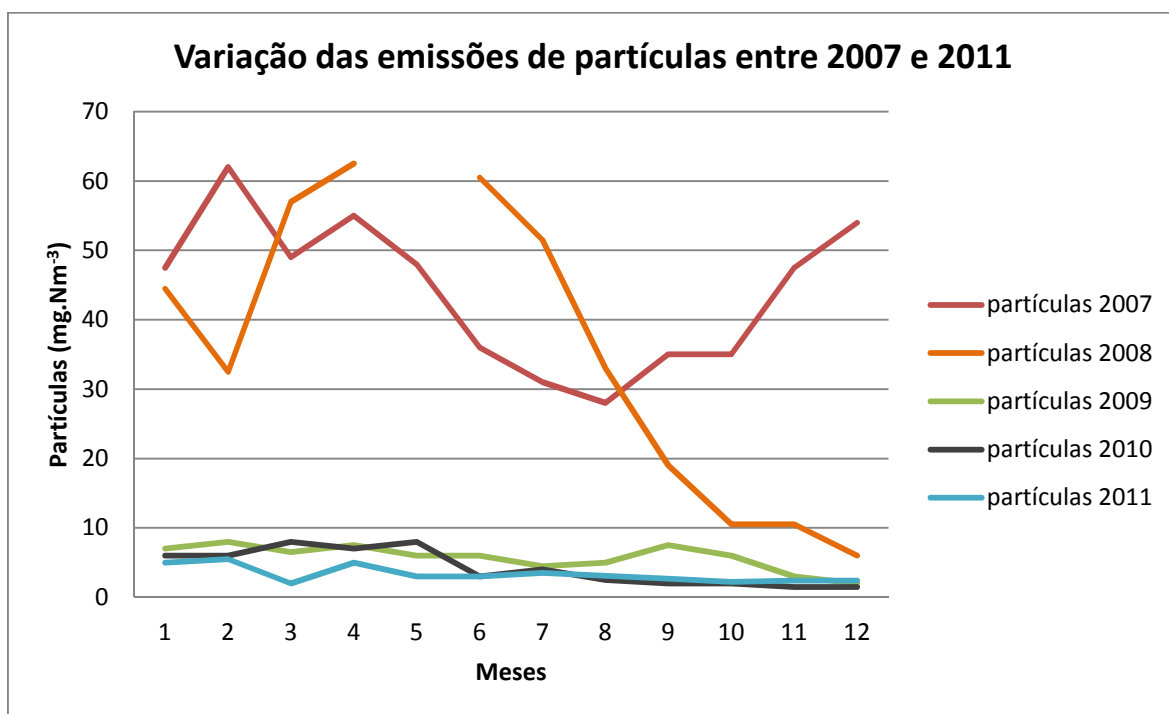


Figura 14 – Variação das emissões de partículas na Central entre 2007 e 2011.

5. Laboratório Químico

O estágio decorreu no Laboratório Químico da Central Termoelétrica do Pego (LQCTP). Neste foram analisados vários parâmetros do processo FGD que permitiram elaborar a análise estatística dos dados recolhidos, bem como o controlo da qualidade do gesso. Além do controlo do processo FGD o LQCTP assume ainda responsabilidades em:

- Garantir o controlo e condicionamento químico dos diferentes circuitos, nomeadamente, o circuito água-vapor, circuito de refrigeração principal e circuito de refrigeração do estator;
- Efectuar o acompanhamento técnico das instalações de tratamento de águas e de efluentes;
- Garantir o controlo das características do carvão consumido na Central, bem como o controlo da qualidade das cinzas produzidas e vendidas.

Em Junho de 1998 o Laboratório obteve por parte do então Instituto Português da Qualidade (IPQ), o certificado de Laboratório de ensaios acreditado para as análises de carvão, sendo na altura o primeiro laboratório acreditado nesta área em Portugal. Em Agosto de 2002, obteve a extensão da acreditação para análises de cinzas [2].

No Laboratório Químico existem quatro grandes áreas de actividade, ou seja, carvão, cinzas, águas e controlo do processo FGD, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Grandes áreas de actividade do Laboratório Químico.

Análises Efectuadas na Laboratório			
Carvão	Cinzas	Águas	FGD
- % de humidade - Enxofre - Azoto - Poder Calorífico - Carbono - Hidrogénio - Voláteis - Cinzas	- Inqueimados - Granulometria - Óxido de Cálcio livre - Óxido de Cálcio Total - Sulfatos - Sílica - Alumina - Ferro - Magnésio - Cloretos	- Circuito água-vapor - Torres refrigeração - Caldeiras auxiliares - Circuitos de refrigeração do estator - Circuito fechado	<u>Gesso</u> - % de humidade - % de carbonatos - Pureza (%) - % de sulfitos - Teor Cloretos <u>Pasta Gesso</u> - Densidade - % Sólidos - pH, K, T <u>Leite Cal</u> - Densidade - % Sólidos <u>Cinzas</u> - % Amónia

5.1. Laboratório Químico e o controlo do processo de dessulfuração

O controlo do processo de dessulfuração tem como objectivo controlar os parâmetros de operação nas várias fases de modo a garantir a sua máxima eficiências e a produção de gesso dentro das especificações.

Os parâmetros controlados no processo são o leite de cal, a pasta de gesso e o gesso.

- **Leite de Cal**

Neste parâmetro é importante fazer um controlo de variáveis como a densidade e a % de sólidos. Na Tabela 4 estão representados os limites de referência esperados para cada variável no *overflow* dos hidrociclones de calcário e também os valores óptimos para este parâmetro. O local de amostragem para o leite de cal é no *overflow* (corrente de saída superior) do hidrociclone de calcário.

Tabela 4 – Valores de referência para a densidade e % de sólidos do leite de cal. [2]

Parâmetro	Local de Amostragem	Variáveis	Valores de Referência	Valores Óptimos
Leite de cal	Hidrociclone de calcário	Densidade (g.cm ⁻³)	1,22-1,25	1,23
		% de sólidos	25-35	30

- **Pasta de Gesso**

A pasta de gesso é um parâmetro fundamental em todo o processo, pelo que o controlo de variáveis como a densidade, % de sólidos, pH e condutividade assume grande importância (Tabela 5). Neste caso as variáveis que têm mais influência no processo de produção do gesso são o pH e a densidade.

O pH é a variável mais importante na reacção química que ocorre no absorvedor, pelo que o desvio deste, em relação aos seus valores de referência, implica a perda de eficiência do processo.

A densidade é a variável que determina se o gesso é ou não produzido, pelo que o desvio desta, em relação aos seus valores de referência, poderá ser um indicador de que a pasta de gesso não apresenta especificação para o processo, podendo ser recirculada do hidrociclone primário para o absorvedor.

Tabela 5 – Valores de referência para a densidade, pH e % de sólidos da pasta de gesso. [2]

Parâmetros	Local de Amostragem	Variáveis	Valores de Referência	Valores Óptimos
Pasta de Gesso	Absorvedor	Densidade (g.cm ⁻³)	1,11-1,13	-----
		% de sólidos	14,24-17,34	-----
		pH	4,5-5,2	4,8

- **Gesso**

O gesso por ser o produto final do processo de dessulfuração e com potencial valor comercial é sujeito a um sério controlo da qualidade. Neste caso como se pretende que o gesso apresente valor comercial, as variáveis mais importantes a analisar são a % de humidade e o grau de pureza do gesso, contudo são também realizadas análises aos teores de carbonatos, sulfitos e cloretos (Tabela 6) [9].

O controlo da % de humidade do gesso é fundamental, pois é esta que define se o gesso tem especificação comercial ou não, pelo que o seu valor deve ser inferior a 10%.

O grau de pureza identifica a percentagem de sulfato de cálcio (CaSO_4) na amostra de gesso pelo este que deve apresentar valores de 90 a 100%. É este parâmetro que indica o destino final do gesso.

A % de carbonatos do gesso é importante, pois permite identificar o grau de conversão no absorvedor. Assim, a quantidade de carbonatos no gesso indica a parte de carbonatos no calcário que não reagiu no sentido de formação de gesso, pelo deverá apresentar valores entre 0,1 a 2%.

Outras variáveis importantes no controlo da qualidade do gesso são a percentagem de sulfitos e cloretos, devendo estes apresentar valores inferiores a 0,25% e 100 ppm, respectivamente.

Tabela 6 – Valores de referência para a % de humidade, grau de pureza, % carbonatos, sulfitos e teor de cloretos do gesso [2].

Parâmetro	Local de Amostragem	Variáveis	Valores de Referência
Gesso	Tapete de secagem	% de humidade	<10
		Grau de Pureza (%)	90 – 100
		Carbonatos (%)	0,1 – 2
		Sulfitos (%)	<0,25
		Cloretos (ppm)	<100

Para a análise estatística dos dados recolhidos, no laboratório destinado ao controlo do processo de dessulfuração, as variáveis em estudo dizem respeito ao “pH” e “densidade da pasta de gesso”, e à “% de humidade do gesso”. Para tal é importante apresentar a descrição dos métodos de ensaio utilizados para a determinação de cada uma das variáveis (os métodos de ensaio detalhados encontram-se no Anexo 2).

5.1.1. Determinação do “pH da pasta de gesso”

A determinação do “pH da pasta de gesso” baseia-se na medição potenciométrica da actividade dos iões H^+ , usando um eléctrodo *standard* de hidrogénio e um eléctrodo de referência previamente calibrados, de acordo com o método C1 da norma de referência EPRI (*Electric Power Research Institute*).

5.1.2. Determinação da “densidade da pasta de gesso”

A determinação da “densidade da pasta de gesso” é calculada pela diferença de massas entre um balão volumétrico calibrado e um balão cheio da amostra de pasta de gesso até ao topo, segundo o método D2 da norma EPRI. A calibração do balão é efectuada segundo os seguintes pontos:

- Registo da massa de um balão volumétrico vazio + rolha, seco na estufa a 40°C;
- Registo da massa do balão volumétrico cheio de água desmineralizada + rolha²;
- Remoção da água do interior do balão e secagem, na estufa, a 40°C até à sua utilização.

² Antes de encher o balão volumétrico com água desmineralizada é necessária a medição da temperatura desta, uma vez que a densidade relativa da água depende da temperatura.

Para determinar a “densidade da pasta de gesso” enche-se o balão previamente calibrado com a amostra e regista-se a sua massa. O cálculo é baseado nas massas registadas no momento da calibração do balão e após o seu enchimento com a amostra de pasta de gesso, de acordo com a equação 6.

$$\rho_{pasta}(g.cm^{-3}) = \frac{(C - A)}{(B - A)} \times D_{rel} \quad (6)$$

Onde, A representa a massa do balão volumétrico vazio + rolha; B representa a massa do balão cheio de água desmineralizada + rolha; C representa a massa do balão volumétrico cheio de pasta de gesso + rolha e D_{rel} , representa a densidade relativa da água à temperatura verificada no momento de calibração do balão.

5.1.3. Determinação da “% de humidade do gesso”

A determinação da “% de humidade do gesso” é efectuada de acordo com o método gravimétrico, segundo a norma VGB – *Determination of moisture, F – gravimetric*, sendo calculada por diferença de massas. Resumidamente a amostra de gesso húmido é pesada numa caixa de Petri e posteriormente submetida, na estufa, a uma temperatura de 40°C durante, aproximadamente, 2h 30min até peso constante. Em seguida, após secagem, o conjunto caixa de Petri + gesso seco vai ser novamente pesada.

O cálculo da “% de humidade do gesso” é baseado nas massas registadas antes e após o processo de secagem a 40°C, de acordo com a equação 7.

$$H (\%) = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad (7)$$

Onde m representa as massas, em gramas, da caixa de Petri vazia (m_1), do conjunto caixa de Petri + gesso húmido (m_2) e do conjunto caixa de Petri + gesso seco (m_3).

6. Análise estatística dos dados

Os dados recolhidos no laboratório, destinado ao controlo do processo de dessulfuração (ver Anexo 3), são relativos às variáveis: “pH da pasta de gesso”, “densidade da pasta de gesso” e “% de humidade do gesso” (que são algumas das mais importantes variáveis no processo de dessulfuração dos gases de combustão). O local de amostragem da pasta de gesso, para a determinação das duas primeiras variáveis, foram os dois absorvedores da instalação de dessulfuração (correspondentes aos dois Grupos da Central) e a “% de humidade do gesso” foi determinada através de amostras recolhidas nos tapetes de vácuo, para cada absorvedor.

A análise estatística³ compreende dois subcapítulos: Estatística Descritiva – com o objectivo de organizar, sintetizar e analisar os dados da amostra obtidos para o estudo das variáveis referidas, de modo a retirar algumas ilações sobre o seu comportamento na população; Inferência Estatística – que permite com um determinado grau de probabilidade, confirmar determinadas características das variáveis na população, recorrendo-se, também, neste ponto às cartas de controlo de qualidade para a média – que permitem a monitorização do processo de produção. Em ambos os subcapítulos procurou-se, ainda, uma análise comparativa das variáveis em estudo, nos dois absorvedores da instalação de dessulfuração da Central ([10]; [11]; [12]; [13]; [14]; [15]).

6.1. Estatística descritiva univariada

No estudo estatístico univariado desenvolvido foram calculadas algumas medidas de tendência central, de ordem, de dispersão e de forma, para o “pH da pasta de gesso” e “densidade da pasta de gesso”, bem como para a “% de humidade do gesso” nos dois absorvedores. Os resultados obtidos, para cada uma das variáveis, apresentam-se em tabelas (onde se encontram algumas medidas descritivas) e em diagramas de

³ O SPSS (Statistical Package for Social Sciences), versão 19, foi o *software* utilizado para a análise estatística dos dados.

extremos-e-quartis paralelos (gráficos *box-plot*), que permitem a comparação visual imediata e informal das duas amostras (absorvedor 1 e absorvedor 2), por exemplo ao nível da assimetria das variáveis, bem como identificar a presença de eventuais *outliers*⁴ (moderados e severos).

6.1.1. Variável: pH da pasta de gesso

Na Tabela 7 constam os valores obtidos para algumas medidas estatísticas da variável “pH da pasta de gesso”, nos dois absorvedores da instalação FGD.

Da comparação dos resultados verifica-se que o absorvedor 2 apresenta valores ligeiramente superiores ao absorvedor 1, para as medidas de tendência central (média, mediana e média aparada a 5%). Em termos da dispersão dos dados, os valores das medidas de dispersão (desvio-padrão, coeficiente de variação relativa e amplitude total) no absorvedor 1 (0,42; 7,8% e 1,73) são superiores aos do absorvedor 2 (0,35; 6,32% e 1,21). Tem se, ainda, que 75% (3.º quartil) das observações apresentam valores de pH abaixo de 6 (Absorvedor 1 com 5,7 e Absorvedor 2 com 5,9, aproximadamente).

Numa análise à assimetria da distribuição para a variável em causa, pode referir-se que a curva de distribuição é assimétrica negativa em ambos os absorvedores, no entanto a assimetria da distribuição é mais acentuada no absorvedor 1, com um coeficiente de assimetria de -0,725.

⁴ Os *outliers* são observações discordantes da ordem de grandeza da generalidade das observações. Os moderados situam-se entre 1,5 e 3 amplitudes inter-quartis para baixo do primeiro quartil ou para cima do terceiro quartil e os severos situam-se para valores superiores ou iguais a 3 amplitudes inter-quartis para baixo do primeiro quartil ou para cima do terceiro quartil.

Relativamente ao achatamento⁵ da distribuição verifica-se que a curva de distribuição, correspondente ao absorvedor 1, é praticamente mesocúrtica (ligeiramente superior a 0), apresentando um coeficiente de achatamento de 0,037.

A curva de distribuição correspondente ao absorvedor 2 é mais achatada (curva platicúrtica) do que a curva de distribuição normal (mesocúrtica), apresentando um coeficiente de achatamento de -1,300.

Tabela 7 – Estatísticas descritivas para o “pH da pasta de gesso”, nos dois absorvedores da instalação FGD.

Estatísticas Descritivas		pH da pasta de gesso	
		Absorvedor 1	Absorvedor 2
Dimensão da amostra - <i>n</i>		36	37
Média aritmética		5,3981	5,5659
Média aparada a 5%		5,4146	5,5702
Mediana		5,5300	5,6400
Moda		5,53	5,06 ^a
Desvio-Padrão		0,41977	0,35202
Coeficiente de variação - CV (%)		7,776%	6,3246%
Coeficiente de assimetria		-0,725	-0,306
Coeficiente de achatamento/curtose		0,037	-1,300
Amplitude total		1,73	1,21
Mínimo		4,44	4,93
Máximo		6,17	6,14
Amplitude inter-quartis		0,63	0,64
Percentis	1.º quartil (25%)	5,0825	5,2150
	2.º quartil (50%)	5,5300	5,6400
	3.º quartil (75%)	5,7125	5,8550

a. Foram identificados dois valores para a moda e considerou-se o menor valor.

⁵ Os coeficientes de assimetria e achatamento são geralmente utilizados para comparar a forma da distribuição empírica em estudo com uma distribuição teórica muito usada em Inferência Estatística, a distribuição normal (ou gaussiana). Para que uma distribuição se possa assumir como normal, os valores dos coeficientes descritos devem ser próximos de zero, i.e. devem estar dentro do intervalo $]-0.5, 0.5[$. Quando os valores absolutos destes coeficientes forem superiores a 1 podemos assumir que a distribuição dos dados em causa não é do tipo normal.

Para uma comparação visual informal da variável “pH da pasta de gesso”, nos dois absorvedores, recorreu-se aos diagramas de extremos-e-quartis paralelos (Figura 15), confirmando-se as assimetrias mencionadas anteriormente. Visualiza-se ainda, que no absorvedor 1 existe uma maior amplitude total dos valores de pH (variando estes entre 4,44 e 6,17), contudo a amplitude inter-quartis (diferença entre o 3.º e 1.º quartis) no absorvedor 2 (que é de 0,64) é ligeiramente superior. Assim, é possível afirmar que existe uma maior dispersão dos dados de “pH da pasta de gesso” no absorvedor 1, não se identificando a presença de *outliers* para esta variável nos dois equipamentos.

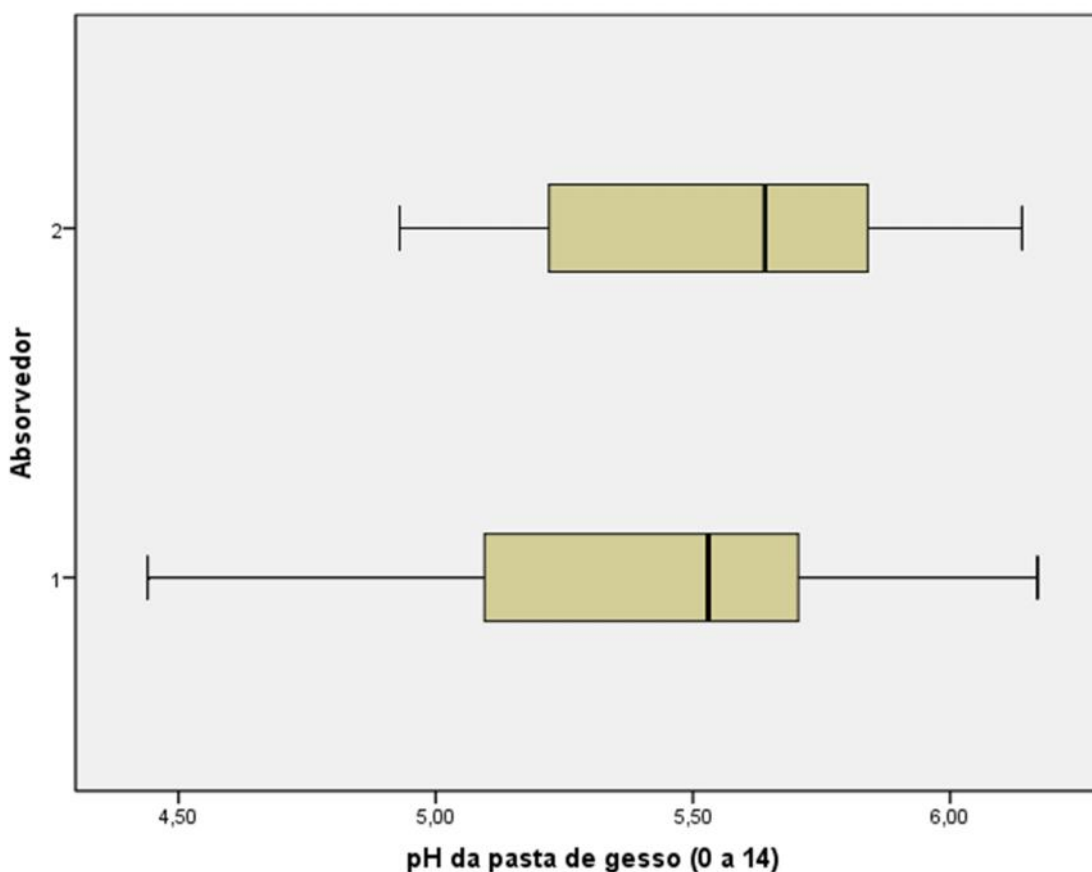


Figura 15 – Diagrama de extremos e quartis para a variável “pH da pasta de gesso”, nos dois absorvedores da instalação FGD.

6.1.2. Variável: Densidade da pasta de gesso

Na Tabela 8 constam os valores obtidos para algumas medidas estatísticas da variável “densidade da pasta de gesso”, nos dois absorvedores da instalação FGD.

Da comparação dos resultados obtidos pelo SPSS verifica-se que o absorvedor 2 apresenta valores ligeiramente superiores ao absorvedor 1, para as medidas de tendência central (média e média aparada a 5%), no entanto, não parecem ser diferenças estatisticamente significativas. Em termos da dispersão dos dados, os valores das medidas de dispersão (desvio-padrão, coeficiente de variação e amplitude total) no absorvedor 2 são ligeiramente superiores aos do absorvedor 1. Conclui-se, ainda, que 75% (3.º quartil) das observações apresentam valores de densidade abaixo de $1,130 \text{ g.cm}^{-3}$ (Absorvedor 1 com $1,129 \text{ g.cm}^{-3}$ e Absorvedor 2 com $1,127 \text{ g.cm}^{-3}$, aproximadamente).

Numa análise à assimetria da distribuição, tem-se que os dois absorvedores apresentam uma assimetria positiva muito acentuada, sendo o absorvedor 2 o que apresenta maior coeficiente de assimetria (4,499).

Relativamente ao achatamento da distribuição, em ambos os absorvedores a curva de distribuição é leptocúrtica (coeficiente de achatamento muito superior a 0), o que indica uma grande concentração dos dados no centro, em torno da média. Sendo o absorvedor 2 que apresenta a curva de distribuição com maior coeficiente de achatamento (23,182).

Tabela 8 – Estatísticas descritivas para a “densidade da pasta de gesso” (g.cm^{-3}) nos dois absorvedores da instalação FGD.

Estatísticas Descritivas		Densidade da pasta de gesso	
		Absorvedor 1	Absorvedor 2
Dimensão da amostra - n		38	39
Média aritmética		1,12413	1,12685
Média aparada a 5%		1,12238	1,12336
Mediana		1,12200	1,12150
Moda		1,112 ^a	1,119 ^a
Desvio-Padrão		0,017372	0,022768
Coeficiente de variação - CV (%)		1,54537%	2,02049%
Coeficiente de assimetria		3,412	4,499
Coeficiente de achatamento/curtose		16,970	23,182
Amplitude total		0,111	0,136
Mínimo		1,100	1,109
Máximo		1,211	1,245
Amplitude Inter-quartis		0,014	0,008
Percentis	1.º quartil (25%)	1,11475	1,11800
	2.º quartil (50%)	1,1220	1,12150
	3.º quartil (75%)	1,12925	1,12650

a. Foram identificados dois valores para a moda e considerou-se o menor valor.

Da observação dos diagramas de extremos-e-quartis paralelos para a variável “densidade da pasta de gesso” (Figura 16), confirma-se as assimetrias mencionadas anteriormente. Visualiza-se ainda, que no absorvedor 2 existe uma maior amplitude total dos valores de densidade (variando estes entre $1,109 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,245 \text{ g.cm}^{-3}$), mas apenas se considerarmos os *outliers*. O absorvedor 1 apresenta uma maior amplitude inter-quartis (diferença entre o 3.º e 1.º quartis), que é de 0,014.

É possível identificar a presença de um *outlier* severo na posição 7 dos dados, com um valor de $1,211 \text{ g.cm}^{-3}$, no absorvedor 1. Nos dados de densidade observada no absorvedor 2 identificam-se dois *outliers* severos nas posições 45 e 46 (com os valores de $1,152 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,245 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente) além de dois *outliers* moderados nas posições 51 e 58 (com os valores de $1,138 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,145 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente).

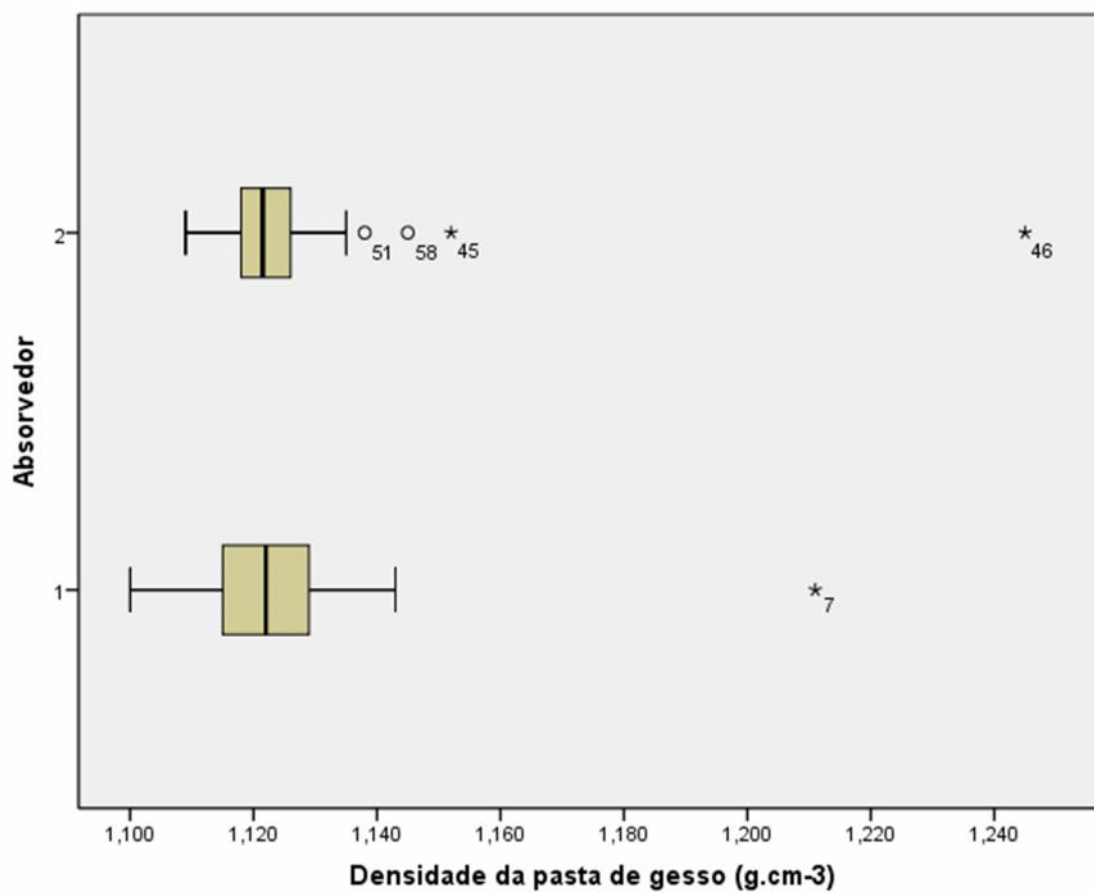


Figura 16 – Diagrama de extremos e quartis para a “densidade da pasta de gesso” nos dois absorvedores da instalação FGD.

6.1.3. Variável: % de humidade do gesso

Na Tabela 9 constam os valores obtidos para algumas medidas estatísticas da variável “% de humidade do gesso”, correspondente aos dois absorvedores da instalação FGD.

Da comparação dos resultados a “% de humidade do gesso”, correspondente ao absorvedor 1, apresenta valores superiores ao do absorvedor 2, para as medidas de tendência central (média, mediana e média aparada a 5%). Em termos da dispersão dos dados, os valores das medidas de dispersão (desvio-padrão, coeficiente de variação relativa, amplitude total e amplitude inter-quartis), para a “% de humidade do gesso” correspondente ao absorvedor 1 (1,98; 22,67%; 8,96 e 2,26) são superiores às correspondentes ao absorvedor 2 (1,20; 15,92%; 5,85 e 1,24). Tem-se, ainda, que 75% (3.º quartil) das observações apresentam valores da “% de humidade do gesso” abaixo de 9,50 (Absorvedor 1 com 9,46 e Absorvedor 2 com 8,09, aproximadamente).

Numa análise à assimetria da distribuição para esta variável, verifica-se que para os dados correspondentes aos dois absorvedores as distribuições são assimétricas positivas, sendo os dados relativos ao absorvedor 2 os que apresentam uma assimetria mais considerável, com um coeficiente de assimetria de 1,065.

Relativamente ao achatamento da distribuição, tem-se que, em ambos os absorvedores, a curva de distribuição é do tipo leptocúrtica, sendo a curva correspondente ao absorvedor 2 a que apresenta um maior coeficiente de achatamento (1,970).

Tabela 9 – Estatísticas descritivas para a “% de humidade do gesso” correspondente aos dois absorvedores da instalação FGD.

Estatísticas Descritivas		% de humidade do gesso	
		Absorvedor 1	Absorvedor 2
Dimensão da amostra - n		42	40
Média aritmética		8,7295	7,5755
Média aparada a 5%		8,6429	7,4925
Mediana		8,4350	7,4750
Moda		9,02 ^a	7,76
Desvio-Padrão		1,97941	1,20592
Coeficiente de variação - CV (%)		22,67495%	15,91869%
Coeficiente de assimetria		0,727	1,065
Coeficiente de achatamento/curtose		0,599	1,970
Amplitude total		8,96	5,85
Mínimo		5,37	5,70
Máximo		14,33	11,55
Amplitude Inter-quartis		2,26	1,24
Percentis	1.º quartil (25%)	7,2050	6,8550
	2.º quartil (50%)	8,4350	7,4750
	3.º quartil (75%)	9,4625	8,0900

a. Foram identificados dois valores para a moda e considerou-se o menor valor.

Pela análise da Figura 17 foi possível confirmar as assimetrias mencionadas anteriormente. Visualiza-se ainda, que a amplitude total dos dados da “% de humidade do gesso” correspondente ao absorvedor 1 é superior à verificada para o absorvedor 2 (variando esta entre 5,37% e 14,33%), se considerarmos os *outliers*, assim como para a amplitude inter-quartis (diferença entre o 3.º e 1.º quartis), que para os dados correspondentes ao absorvedor 1 é de 2,26.

Identifica-se, também, a presença de dois *outliers* moderados na posição 27 e 28 dos dados (com os valores de 14,33% e 12,90%, respectivamente), para a “% de humidade do gesso”, correspondente ao absorvedor 1. Nos dados da “% de humidade do gesso”, correspondente absorvedor 2, identifica-se igualmente dois *outliers* moderados nas posições 63 e 70 (com os valores de 10,19% e 11,55%, respectivamente).

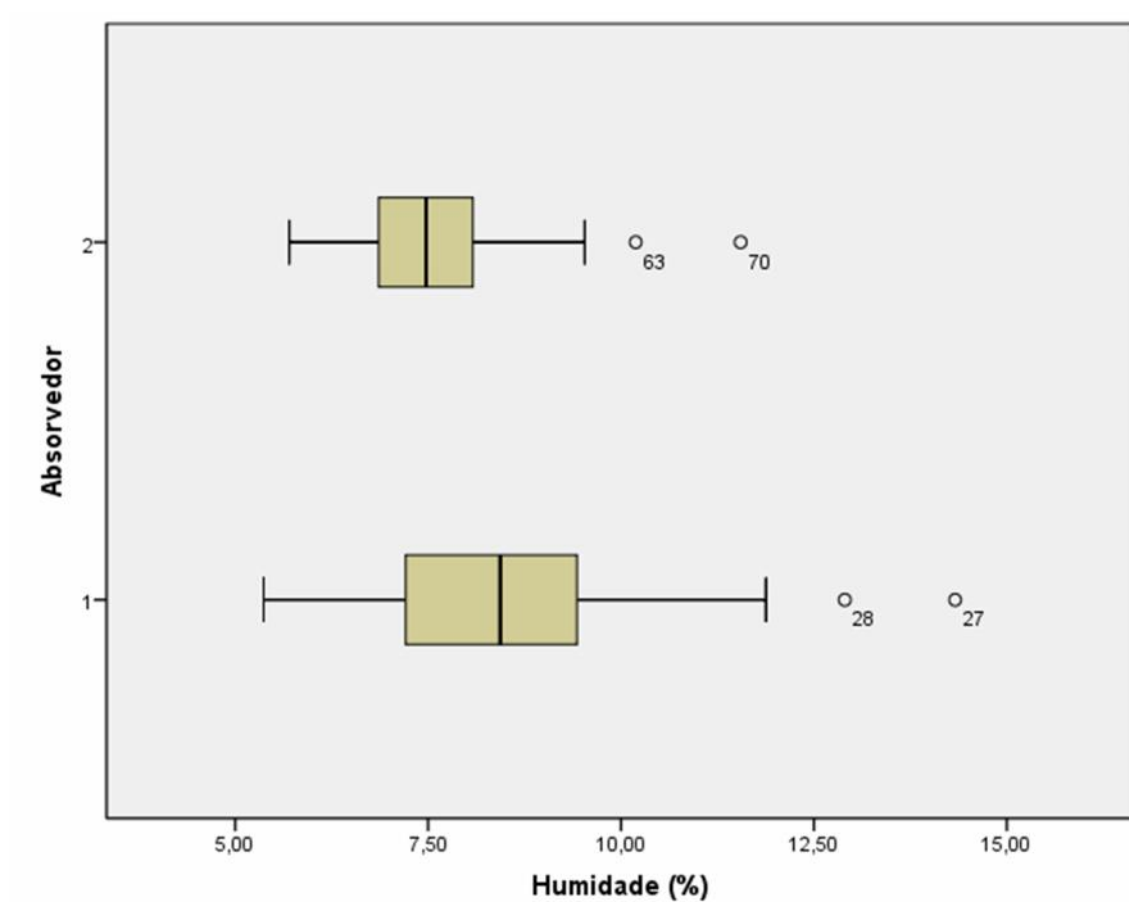


Figura 17 – Diagrama de extremos e quartis para a “% de humidade do gesso” correspondente aos dois absorvedores da instalação de FGD.

6.2. Inferência Estatística

No estudo estatístico inferencial foram realizados testes de hipóteses paramétricos para amostras independentes, com o objectivo de comparar, para um nível de significância de 5%, as médias populacionais dos dois absorvedores da instalação FGD, ou seja, verificar se existem, ou não, diferenças significativas ao nível deste parâmetro populacional, para cada variável considerada, nos dois equipamentos. Recorreu-se, então, ao *Teste t – Student* para amostras independentes, contudo, para a aplicação deste tipo de teste é necessária a verificação dos pressupostos seguintes: as amostras são provenientes de populações com distribuição normal ou aproximadamente normal; e, a existência da homogeneidade das variâncias. Para a verificação destas condições foram utilizados os testes de *Kolmogorov – Smirnov (K – S)* e o *Teste de Levene*, respectivamente ([10]; [11]; [12]; [13]; [14]; [15]).

Foram, também, calculados Intervalos de Confiança (IC) para a média populacional das variáveis em estudo, para um grau de confiança de 95% e 99%. Construíram-se posteriormente, para essas variáveis, cartas de controlo de qualidade para a média populacional.

6.2.1. Testes de hipóteses para comparação de médias populacionais com amostras independentes

- Pressupostos de aplicação do *Teste t – Student*:

Em primeiro lugar surge a necessidade de verificar a normalidade das variáveis em estudo, para cada absorvedor, pelo *Teste K – S*, para um nível de significância (α) de 5%, sendo as hipóteses do teste as seguintes:

- Hipótese nula (H_0) – a distribuição das variáveis aproxima-se da normalidade com parâmetros μ e σ quaisquer;
- Hipótese alternativa (H_1) – a distribuição das variáveis é significativamente diferente da distribuição normal.

$$H_0 : X \sim N(\mu; \sigma) \text{ versus } H_1 : X \not\sim N(\mu; \sigma).$$

O *Teste K – S* fornece o valor de prova (*p-value* ou *sig.*, no *output* do SPSS), que pode ser interpretado como a medida do grau de concordância entre os dados e a hipótese nula (H_0), que corresponde à distribuição normal. Assim, quanto menor for o *p-value*, menor será a consistência entre os dados e a hipótese nula. Então, a regra de decisão adotada para saber se a distribuição é, ou não, normal é rejeitar H_0 se $p\text{-value} \leq \alpha$, sendo válida a hipótese alternativa (H_1).

Outra condição que requer ser estudada é a homogeneidade das variâncias, nos dois absorvedores para as variáveis em estudo, pelo *Teste de Levene*, de acordo com as seguintes hipóteses:

- Hipótese nula (H_0) – existe homogeneidade das variâncias, para a variável considerada, nos absorvedores 1 e 2;
- Hipótese alternativa (H_1) – não existe homogeneidade das variâncias, para a variável considerada, nos absorvedores 1 e 2.

$$H_0: \sigma^2_{abs1} = \sigma^2_{abs2} \text{ versus } H_1: \sigma^2_{abs1} \neq \sigma^2_{abs2}.$$

O parâmetro *p-value* é igualmente fornecido por este teste, sendo a sua interpretação feita de forma idêntica à do caso da Normalidade, ou seja, para este caso se $p\text{-value} \leq \alpha$, para um nível de significância de 5%, rejeita-se H_0 e pode concluir-se que não existe homogeneidade de variâncias nos dois absorvedores, assim a hipótese alternativa é válida.

Depois de verificadas estas duas condições essenciais a etapa seguinte é estudar se as médias populacionais dos dois absorvedores da instalação FGD são, ou não, significativamente diferentes para as variáveis consideradas. Este estudo vai ser realizado pelo *Teste t – Student* para amostras independentes, de acordo com as seguintes hipóteses:

- Hipótese nula (H_0) – as médias populacionais, para a variável considerada, nos dois absorvedores não se podem considerar significativamente diferentes;
- Hipótese alternativa (H_1) – as médias populacionais, para a variável considerada, nos dois absorvedores são significativamente diferentes.

$$H_0: \mu_{abs1} = \mu_{abs2} \text{ versus } H_1: \mu_{abs1} \neq \mu_{abs2}.$$

6.2.1.1. Variável: pH da pasta de gesso

➤ Teste à normalidade

Como referido anteriormente, para testar a normalidade da distribuição das variáveis o método utilizado foi o *Teste K – S*, com um grau de confiança de 95%, e os resultados obtidos estão representados na Tabela 10. Pela análise dos mesmos, verifica-se que os *p-value* (Sig., na Tabela 10) obtidos, para a variável “pH da pasta de gesso”, nos absorvedores 1 e 2, são de 0,037 e 0,005, respectivamente. Um baixo valor de significância (*p-value* < 0,05), indicando que a distribuição difere significativamente de uma distribuição normal. Rejeita-se, então, a hipótese de normalidade (H_0) da variável “pH da pasta de gesso” no absorvedor 1 ($0,037 < 0,05$) e no absorvedor 2 ($0,005 < 0,05$).

Tabela 10 – Resultados do Teste à normalidade para a variável “pH da pasta de gesso”.

<i>Teste Kolmogorov – Smirnov</i>				
Absorvedor		Statistic.*	df**	Sig.***
pH	1	0,151	36	0,037
	2	0,176	37	0,005

Statistic.* = estatística de teste; df** = número de amostras; Sig.*** = significância (*p-value*).

Segundo o *Teste K – S* a condição de normalidade para o “pH da pasta de gesso” nos dois absorvedores não é validada, impedindo assim a continuação do estudo estatístico inferencial comparativo, sobre a média populacional, para esta variável nos dois equipamentos. Contudo, pelo Teorema do Limite Central (TLC), para uma amostra de dimensão superior a 30, a distribuição das médias amostrais pode ser satisfatoriamente aproximada à distribuição normal com médias e variâncias aproximadamente iguais às da população. Assim, como a dimensão da amostra para esta variável é de $n = 36$ e $n = 37$, para os absorvedores 1 e 2, respectivamente, a aplicação do TLC permite “ultrapassar” a condição de normalidade.

➤ Teste *t-Student* e Teste de Levene para amostras independentes

Para testar se as médias populacionais do “pH da pasta de gesso” são, ou não, significativamente diferentes nos dois absorvedores, utilizou-se o teste *t – Student* para amostras independentes, com um grau de confiança de 95%. Os resultados obtidos para este teste estão representados na Tabela 11. Desta consta, ainda, o resultado do teste de Levene para a homogeneidade das variâncias, segunda condição que requer verificação/validação.

Pela análise da Tabela 11, verifica-se que o resultado do *p-value*, para o Teste de Levene, é de 0,623 o que significa que não se rejeita H_0 , ou seja, pode considerar-se a homogeneidade das variâncias, para esta variável, nos dois absorvedores ($0,623 > 0,05$), pelo que se verifica o segundo pressuposto de aplicação do Teste *t – Student*.

No que respeita ao Teste *t – Student* para amostras independentes, observa-se que o resultado do *p-value*, para este teste, é de 0,068 ($> 0,05$), pelo que não se rejeita a hipótese nula (H_0), ou seja, as médias populacionais do “pH da pasta de gesso” nos dois absorvedores não se podem considerar significativamente diferentes.

Tabela 11 – Resultados dos Testes de Levene (testa a homogeneidade das variâncias) e *t – Student* (para comparar médias populacionais), respectivamente.

		Teste de Levene		Teste <i>t – Student</i> para amostras independentes		
		F*	Sig.**	t***	df****	Sig. (2-tailed)*****
pH	Igualdade de variâncias assumida	0,244	0,623	-1,854	71	0,068

F* = Estatística do Teste de Levene; Sig.** = Significância (*p-value* do Teste Levene); t*** = Estatística do Teste *t – Student*; df**** = número de amostras; Sig. (2-tailed)***** = Significância (*p-value* do Teste *t – Student*)

6.2.1.2. Variável: Densidade da pasta de gesso

➤ Teste à normalidade

Os resultados do *Kolmogorov – Smirnov* para testar a normalidade da distribuição amostral estão representados na Tabela 12. Pela sua análise é possível verificar que os *p-value* obtidos, para esta variável nos dois absorvedores, são iguais ou aproximadamente iguais a zero. Assim, conclui-se que para este teste, se rejeita a hipótese de normalidade (H_0) nos dois absorvedores ($0,000 < 0,05$).

Tabela 12 – Resultados do Teste à normalidade para a variável “densidade da pasta de gesso”.

<i>Teste Kolmogorov – Smirnov</i>				
Absorvedor		Statistic.*	df**	Sig.***
Densidade (g.cm ⁻³)	1	0,210	38	0,000
	2	0,291	39	0,000

Statistic.* = estatística de teste; df** = número de amostras; Sig.*** = significância (*p-value*).

Segundo o *teste K – S* a condição de normalidade para a “densidade da pasta de gesso” não se verifica nos dois absorvedores. No entanto, para superar esta condição e continuar com o estudo estatístico inferencial invoca-se, mais uma vez, o TLC, dado que a dimensão da amostra para esta variável é de $n = 38$ e $n = 39$, para os absorvedores 1 e 2, respectivamente.

➤ Teste *t-Student* e Teste de Levene para amostras independentes

Na Tabela 13 constam os resultados obtidos dos *Testes t – Student* e de *Levene*, utilizados, neste caso, para testar se as médias populacionais da “densidade da pasta de gesso” são, ou não, significativamente diferentes nos dois absorvedores e verificar a homogeneidade das variâncias, respectivamente.

Analisando a Tabela 13, observa-se que o resultado do *p-value*, para o *Teste de Levene*, é de 0,945, pelo que não se rejeita H_0 . Considera-se, assim, a homogeneidade das variâncias nos dois absorvedores para esta variável ($0,945 > 0,05$), sendo verificado o segundo pressuposto.

No que respeita ao *Teste t - Student* para amostras independentes, observa-se que o valor obtido para o *p-value* é de 0,714, pelo que não se rejeita a hipótese nula (H_0), ou seja, as médias populacionais da “densidade de pasta de gesso”, não se podem considerar significativamente diferentes, nos dois absorvedores.

Tabela 13 – Resultados dos Testes de *Levene* (testa a homogeneidade das variâncias) e *t – Student* (para comparar médias populacionais), respectivamente.

		<i>Teste de Levene</i>		<i>Teste t-student</i> para amostras independentes		
		F*	Sig.**	t***	df****	Sig. (2-tailed)*****
Densidade (g.cm⁻³)	Igualdade de variâncias assumida	0,005	0,945	-0,368	75	0,714

F* = Estatística do *Teste de Levene*; Sig.** = Significância (*p-value* do *Teste Levene*); t*** = Estatística do *Teste t – Student*; df**** = número de amostras; Sig. (2-tailed)***** = Significância (*p-value* do *Teste t – Student*)

6.2.1.3. Variável: % de humidade do gesso

➤ Teste à normalidade

Da Tabela 14 constam os resultados obtidos do *Teste K – S* para testar a normalidade da distribuição amostral. Pela sua análise é possível verificar que os *p-value* obtidos, para a “% de humidade do gesso” correspondente aos absorvedores 1 e 2, são de 0,107 e 0,121, respectivamente. Deste modo, é possível concluir que não se rejeita a hipótese de normalidade (H_0) para o conjunto de dados correspondentes ao absorvedor 1 ($0,107 > 0,05$) e ao absorvedor 2 ($0,121 > 0,05$), pelo que a condição de normalidade da distribuição para esta variável é verificada.

Tabela 14 – Resultados do Teste à normalidade para a variável “% de humidade do gesso”.

<i>Teste Kolmogorov – Smirnov</i>				
Absorvedor		Statistic.*	df**	Sig.***
% de humidade	1	0,124	42	0,107
	2	0,124	40	0,121

Statistic.* = estatística de teste; df** = número de amostras; Sig.*** = significância (*p-value*).

➤ Teste *t-Student* e Teste de Levene para amostras independentes

Os resultados obtidos dos *Testes t – Student* e de *Levene*, estão representados na Tabela 15. Da análise desta, observa-se, desde logo, que o *p-value* obtido, para o *Teste de Levene*, é de 0,014, o que significa que se rejeita a hipótese da homogeneidade das variâncias (H_0), não se verificando o segundo pressuposto para $\alpha = 5\%$ ($0,014 < 0,05 = \alpha$), mas já se verifica se for considerado um nível de significância de $\alpha = 1\%$.

No que respeita ao *Teste t – Student*, o *p-value* obtido é de 0,02, ou seja, rejeita-se H_0 , o que significa que as médias populacionais da “% de humidade do gesso” são significativamente diferentes nos dois absorvedores.

Tabela 15 – Resultados dos Testes de *Levene* (testa a homogeneidade das variâncias) e *t – Student* (para comparar médias populacionais), respectivamente.

		<i>Teste de Levene</i>		<i>Teste t – Student</i> para amostras independentes		
		F*	Sig.**	t***	df****	Sig. (2-tailed)*****
% de Humidade	Igualdade de variâncias assumida	6,311	0,014	3,169	80	0,02

F* = Estatística do *Teste de Levene*; Sig.** = Significância (*p-value* do *Teste Levene*); t*** = Estatística do *Teste t – Student*; df**** = número de amostras; Sig. (2-tailed)***** = Significância (*p-value* do *Teste t – Student*)

Esta desigualdade entre as médias populacionais das “% de humidades do gesso”, relativas aos dois absorvedores, poderá advir das diferentes condições de operação verificadas principalmente ao nível dos tapetes de vácuo, no período tempo considerado neste estudo. É importante salientar igualmente que um dos tapetes de vácuo, que tinha como função a desidratação do gesso produzido ao nível do absorvedor 1, não esteve a funcionar nas devidas condições principalmente durante o mês de Maio, sendo posteriormente substituído.

Outra explicação possível diz respeito à grande instabilidade da carga dos dois Grupos produtores de energia, durante o período de tempo correspondente à recolha dos dados, este factor tem consequências ao nível da reacção química que ocorre no processo

de dessulfuração, levando à produção de gesso com um nível de qualidade ligeiramente inferior ao verificado em anos anteriores.

6.2.2. Intervalos de Confiança e Cartas de Controlo de qualidade

Dado que o objectivo é obter uma estimativa para a média populacional, μ , das variáveis em estudos, nos dois absorvedores, foram construídos Intervalos de Confiança (IC), para este parâmetro, com um grau de confiança de 95% e de 99% ([10]; [11]; [12]; [13]; [14]; [15]). É importante salientar que os IC para a média foram, apenas, construídos para as variáveis “densidade da pasta de gesso” e “% de humidade do gesso”, uma vez que cada observação destas variáveis corresponde à média de dois ensaios laboratoriais. No caso da variável “pH da pasta de gesso” foram construídos Limites a 95% e 99%, uma vez que cada observação corresponde, apenas, ao valor de um ensaio/“leitura” de pH.

Foram ainda construídas cartas de controlo estatístico, ou Cartas *Shewhart*, para a média, de cada variável, estas são técnicas de estatística “on-line” que actuam enquanto está a decorrer o processo produtivo, permitindo a sua monitorização. Nas cartas de controlo estatístico elaboradas estão representados os Limites Superior e Inferior de Aviso (LSA e LIA), que correspondem aos IC a 95% calculados; os Limites Superior e Inferior de Controlo (LSC e LIC), que correspondem aos IC a 99%, bem como os Limites Superior e Inferior de Referência (LSR e LIR), valores considerados de referência no controlo do processo ([16]; [17]; [18]).

➤ Cartas de Controlo para a média

- Planeamento da regra de decisão, de modo a ter-se suficiente certeza de que a qualidade dos produtos está de acordo com as normas exigidas.

Exemplo: Absorvedor 1 – “densidade da pasta de gesso”

Com um grau de confiança de 95%, pode dizer-se que a média amostral \bar{X} deve estar compreendida no intervalo entre $\bar{X} - 1,96 \times S'/\sqrt{n}$ e $\bar{X} + 1,96 \times S'/\sqrt{n}$. Para a amostra

obtida a média amostral deve estar compreendida entre, aproximadamente, 1,12 e 1,13 g.cm⁻³.

Deste modo, a regra de decisão será:

- i. se a média amostral da densidade “cair” no intervalo 1,12 e 1,13 g.cm⁻³, admite-se que o absorvedor está a funcionar de acordo com as normas exigidas (o processo está sob controlo), e;
 - ii. no caso contrário, conclui-se que o funcionamento do absorvedor é irregular e é necessário analisar a causa.
- Representação gráfica da regra de decisão

O registo das médias amostrais pode ser realizado através de uma carta de controlo de qualidade. Sempre que for calculada uma média amostral, poderá ser representada por um ponto particular. Enquanto estes “caírem” entre os limites obtidos o processo está sob controlo, mas se um ponto se situar fora desses limites de controlo, ou se, se verificar a existência de uma sequência ordenada de pontos, há a possibilidade de algo estar errado e justificar uma investigação/intervenção.

6.2.2.1. Variável: pH da pasta de gesso

Como consideramos que as observações da amostra são provenientes de uma população com distribuição aproximadamente normal, é esperado que 95% das mesmas se encontrem entre $\bar{X} \pm 2 \times S'$ (ou, mais precisamente, entre $\bar{X} \pm 1,96 \times S'$).

Para um grau de confiança de 99%, espera-se que 99% das observações se encontrem entre $\bar{X} \pm 2,58 \times S'$. Assim, tem-se como limites os valores que constam da Tabela 16.

Tabela 16 – Limites a 95% e 99% para o “pH da pasta de gesso”.

pH da pasta de gesso		Absorvedor 1	Absorvedor 2
Limites a 95%	Limite inferior	4,5753 \approx 4,58	4,8795 \approx 4,88
	Limite superior	6,2208 \approx 6,22	6,2522 \approx 6,25
Limites a 99%	Limite inferior	4,3151 \approx 4,32	4,6624 \approx 4,66
	Limite superior	6,4811 \approx 6,48	6,4694 \approx 6,47

Nas Figuras 18 e 19 estão representados, graficamente, os limites a 95% e 99%, obtidos para a variável “pH da pasta de gesso”, nos dois absorvedores. Na Figura 18, verifica-se que aproximadamente 95% das observações de pH se encontram entre os Limites Superior e Inferior, calculados para um grau de confiança de 95% (LS e LI, respectivamente), e que a totalidade das observações se encontram entre os Limites Superior e Inferior, para um grau de confiança de 99%.

Analisando a Figura 19, tem-se que a totalidade das observações desta variável se encontra entre os limites calculados.

No que respeita à média da amostra das observações de pH, referente à Linha Central (LC), observa-se que nos dois casos esta se encontra acima dos limites de referência, sendo ainda, superior ao “Valor Ótimo – V.O.” (valor de pH que permite o maior rendimento do processo) esperado para esta variável.

Dos dois gráficos tem-se ainda que, na parte inicial e final dos mesmos, existem oito ou mais pontos consecutivos (mais precisamente, 14 e 13 pontos nos absorvedores 1 e 2, respectivamente) que ficam no mesmo lado da Linha Central, este “enviesamento sistemático”, poderá indicar que o processo não deverá estar a funcionar nas melhores condições, influenciando o seu rendimento.

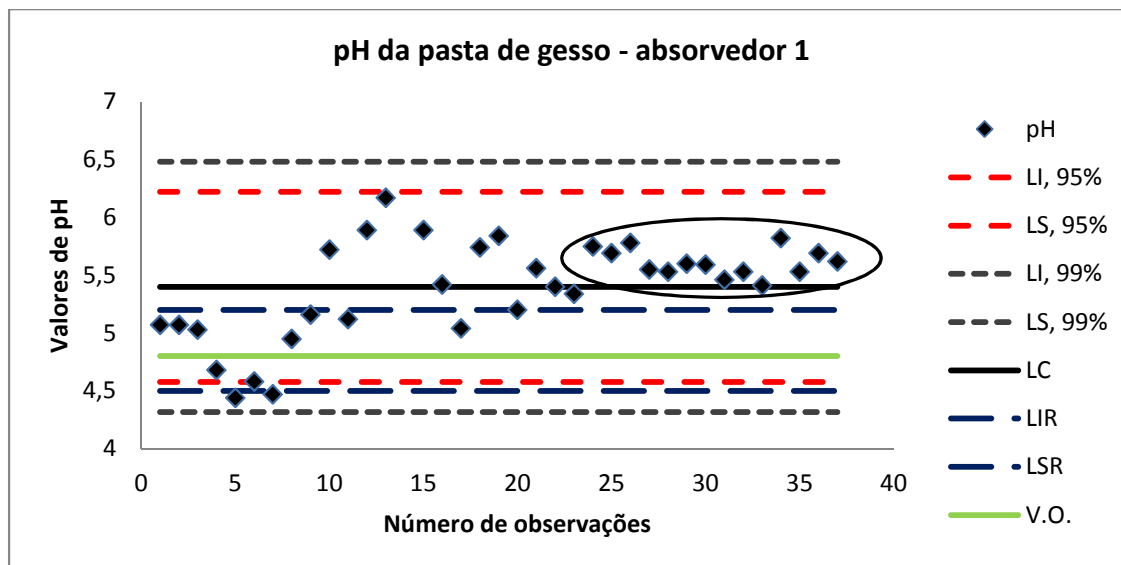


Figura 18 – Carta para o “pH da pasta de gesso”, no absorvedor 1.

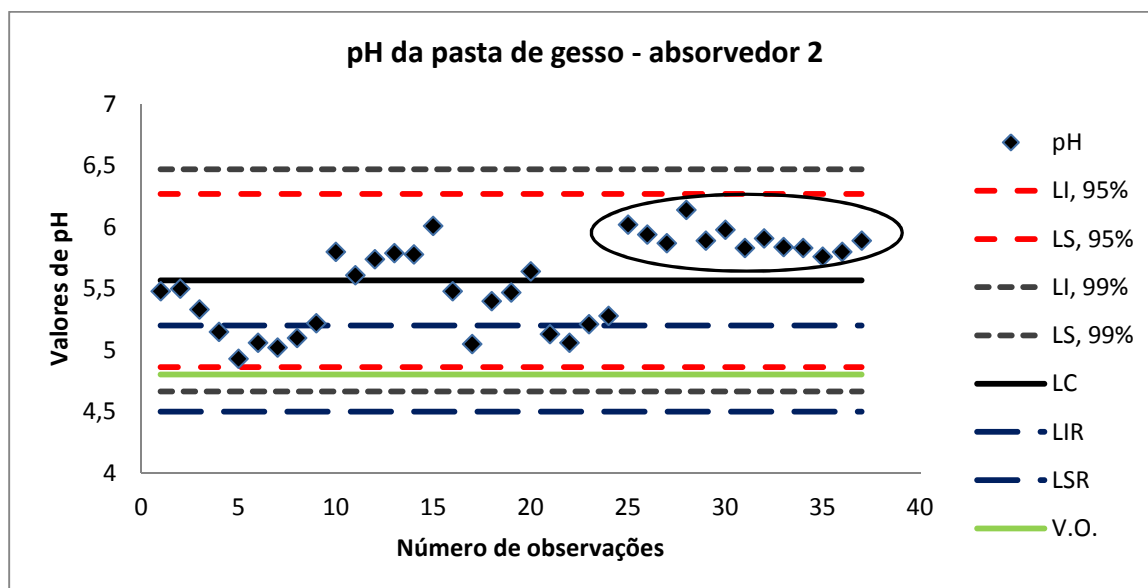


Figura 19 – Carta para o “pH da pasta de gesso”, no absorvedor 2.

6.2.2.2. Variável: Densidade da pasta de gesso

Na Tabela 17 estão representados os IC para a média populacional da “densidade da pasta de gesso”, nos dois absorvedores, com um grau de confiança de 95% e 99%. Assim, para um grau de confiança de 95%, tem-se o intervalo [1,12; 1,13], no absorvedor 1, e o intervalo [1,12; 1,13], no absorvedor 2. Para um grau de confiança de 99%, têm-se os intervalos [1,12; 1,13] e [1,12; 1,14], para os absorvedores 1 e 2, respectivamente.

Tabela 17 – Intervalos de Confiança a 95% e 99% para a média da “densidade da pasta de gesso”.

Densidade da pasta de gesso (g.cm ⁻³)		Absorvedor 1	Absorvedor 2
Intervalo de confiança a 95% para a média populacional	Limite inferior	1,1184 \approx 1,12	1,1189 \approx 1,12
	Limite superior	1,1298 \approx 1,13	1,1348 \approx 1,13
Intervalo de confiança a 99% para a média populacional	Limite inferior	1,1165 \approx 1,12	1,1165 \approx 1,12
	Limite superior	1,1318 \approx 1,13	1,1351 \approx 1,14

Nas Figuras 20 e 21 estão representadas as cartas de controlo estatístico de qualidade construídas para a variável considerada, nos absorvedores 1 e 2. Analisando em primeiro lugar a Figura 20, é possível observar que os Limites Superior de Aviso (a 95%) e de Referência (LSA e LSR) são aproximadamente iguais. Visualiza-se ainda, que no início deste gráfico existem 10 pontos consecutivos que ficam abaixo da Linha Central. Na Figura 21 evidencia-se desde logo um dos *outliers*, também identificado no sub-capítulo referente à estatística descritiva univariada, para esta variável no absorvedor 2, e que corresponde à observação que tem o maior valor na amostra (mais precisamente, 1,245 g.cm⁻³). Uma das consequências deste *outlier* e que é facilmente perceptível, prende-se com o facto de este “esmagar” a carta de controlo, dificultando a sua observação. Tem-se ainda que, 13 (no início do gráfico) e 9 pontos (mais para a parte final do gráfico) se situam abaixo da Linha Central.

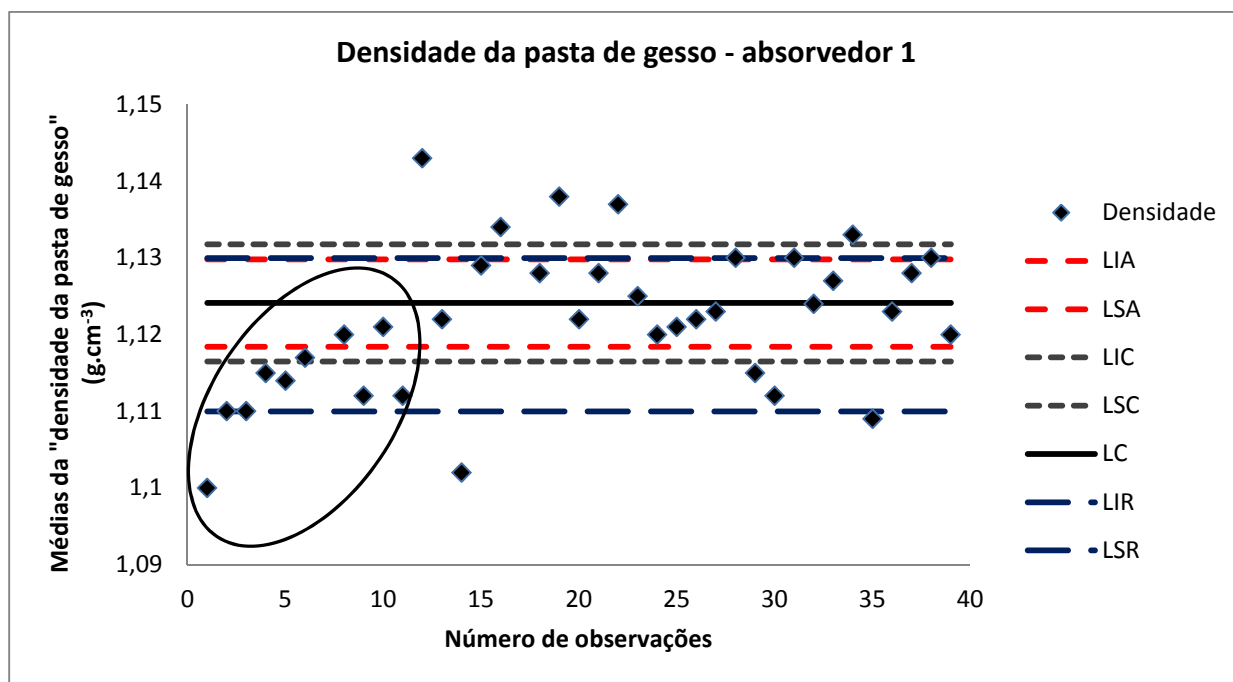


Figura 20 – Carta de controlo de qualidade para a média da “densidade da pasta de gesso”, no absorvedor 1.

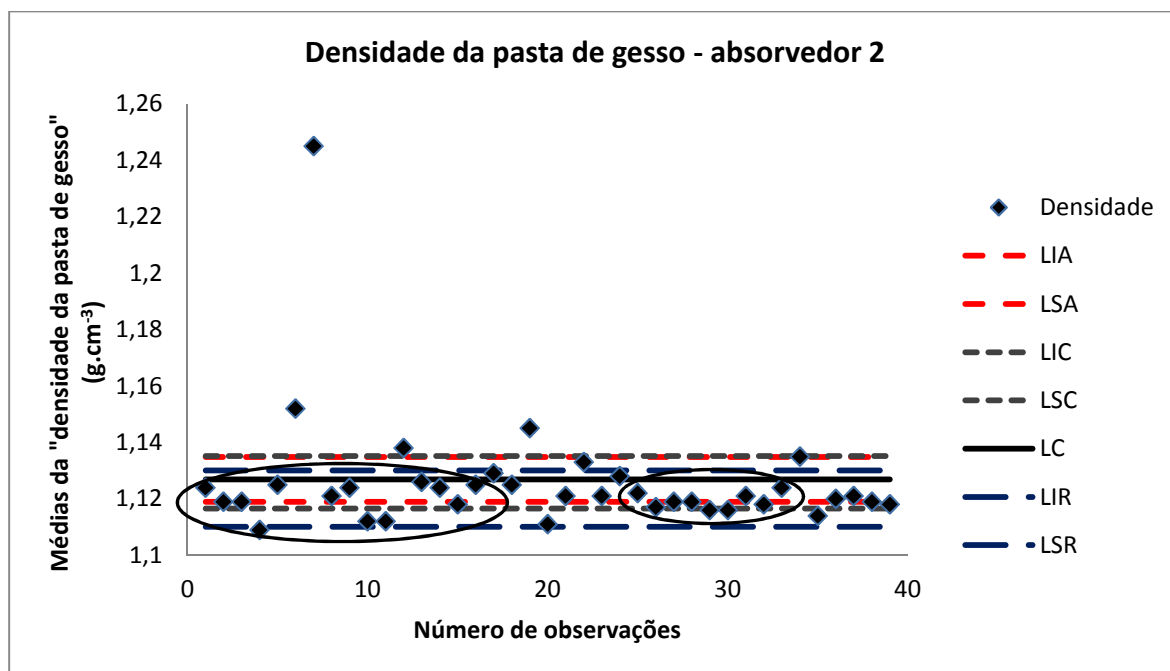


Figura 21 – Carta de controlo de qualidade para a média da “densidade da pasta de gesso”, no absorvedor 2.

6.2.2.3. Variável: % de humidade do gesso

Os IC para a média populacional da “% de humidade do gesso”, correspondentes aos dois absorvedores, estão representados na Tabela 18. Para um grau de confiança de 95% têm-se os intervalos [8,11; 9,35] e [7,19; 7,96], nos absorvedores 1 e 2, respectivamente. Para um grau de confiança de 99% têm-se os intervalos [7,90; 9,55] e [7,06; 8,09], nos absorvedores 1 e 2, respectivamente.

Tabela 18 – Intervalos de Confiança a 95% e a 99% para a “% de humidade do gesso”.

% de humidade do gesso		Absorvedor 1	Absorvedor 2
Intervalo de confiança a 95% para a média populacional	Limite inferior	8,1127 \approx 8,11	7,1898 \approx 7,19
	Limite superior	9,3464 \approx 9,35	7,9612 \approx 7,96
Intervalo de confiança a 99% para a média populacional	Limite inferior	7,9045 \approx 7,90	7,0592 \approx 7,06
	Limite superior	9,5545 \approx 9,55	8,0910 \approx 8,09

As cartas de controlo de qualidade para a média elaboradas, para a variável “% de humidade do gesso”, nos dois absorvedores, estão representadas nas Figuras 22 e 23. Pela análise da Figura 22 observa-se, em primeiro lugar, na parte inicial do gráfico, uma série de 10 pontos consecutivos abaixo da LC. Na parte final do gráfico, existe uma tendência decrescente dos pontos, seguida de uma sequência de 8 pontos consecutivos abaixo da LC. Na Figura 23 está evidenciada uma tendência crescente dos pontos.

Tem-se ainda que, 95% das observações da “% de humidade do gesso”, correspondente ao absorvedor 2, se encontram abaixo do LSR – (que corresponde a uma “% de humidade do gesso” igual a 10%), ou seja, a proporção de observações não-conformes é de apenas 5% (2 observações acima do LSR, numa amostra de dimensão 40), o que significa que grande parte do gesso produzido por este absorvedor, apresenta especificação comercial. Para o absorvedor 1, verifica-se uma percentagem de observações não-conformes superior, na ordem dos 21,4% (9 observações acima do LSR, numa amostra de dimensão 42), podendo a avaria de um dos tapetes de vácuo que recebia o gesso produzido ao nível deste absorvedor, como já havia sido referido anteriormente, ser uma possível causa para esta proporção de não-conformes.

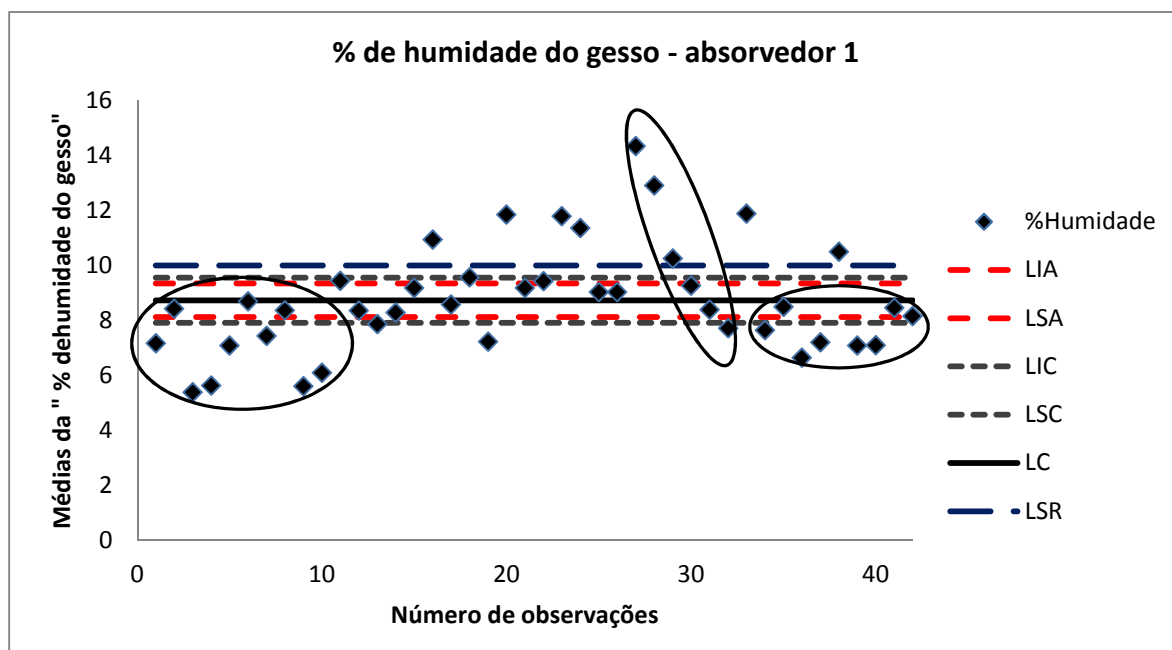


Figura 22 – Carta de Controlo de qualidade para a média da “% de humidade do gesso” correspondente ao absorvedor 1.

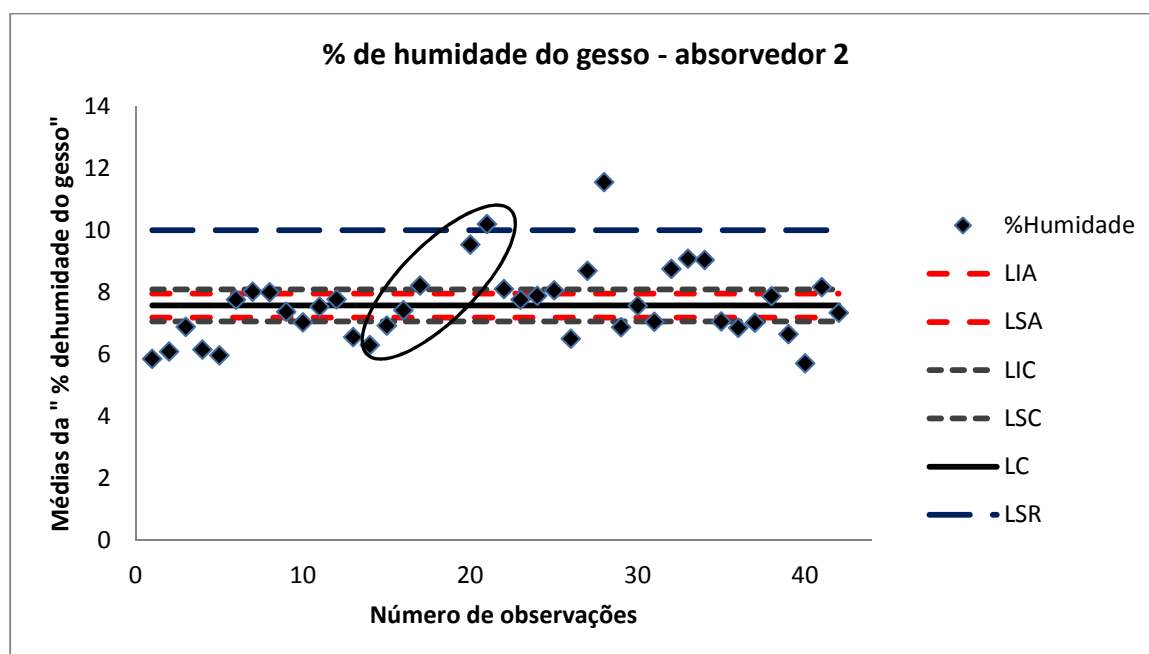


Figura 23 – Carta de controlo de qualidade para a média da “% de humidade do gesso” correspondente ao absorvedor 2.

7. Considerações finais

O estudo realizado na Central Termoeléctrica do Pego permitiu, numa primeira fase, fazer a descrição geral do processo de produção de energia eléctrica através da combustão de carvão e, posteriormente, apresentar as tecnologias utilizadas na redução e controlo das emissões de NO_x , SO_2 e partículas, efluentes originários da combustão deste combustível fóssil.

Da análise dos dados relativos à emissão de NO_x , SO_2 e partículas, entre 2007 e 2011, ficou comprovada a eficácia dos sistemas de tratamentos de gases (SCR, FGD e melhoria da performance dos precipitadores electrostáticos), permitindo à Central Termoeléctrica do Pego cumprir as restrições legais referentes às emissões deste tipo de efluentes, ainda com valores abaixo dos exigidos pela legislação apenas a partir do ano 2016.

O principal objectivo do estágio realizado consistia no estudo do processo de dessulfuração (FGD) dos gases de combustão, para tal, no Laboratório Químico da Central foram recolhidos dados relativos a algumas variáveis importantes, no controlo deste processo (“pH” e “densidade da pasta de gesso”, e “% de humidade do gesso”), e que permitiram a elaboração da sua análise estatística.

Numa primeira análise às variáveis, foi possível fazer uma comparação do comportamento destas ao nível dos dois absorvedores e ainda identificar a presença de possíveis *outliers*. Assim, pela análise estatística comparativa com base em amostras independentes, verificou-se que as médias populacionais das variáveis “pH” e “densidade da pasta de gesso” não se podem considerar significativamente diferentes nos dois absorvedores. Contudo, para a variável “% de humidade do gesso” concluiu-se que existe uma diferença, estatisticamente significativa, nas médias populacionais dos dois equipamentos (sendo a avaria de um dos tapetes de vácuo, utilizado na desidratação do gesso produzido, no absorvedor 1, e a grande instabilidade dos Grupos produtores de energia, durante o período de recolha de dados, factores eventualmente relacionados com esta desigualdade).

Em todos os processos produtivos, independentemente da sua cuidadosa planificação e manutenção, há sempre variabilidade nas características em estudo. Neste estudo, a construção das cartas de controlo estatístico de qualidade, para as variáveis consideradas, permitiu verificar que os dois absorvedores da instalação FGD não funcionam de modo regular, em todo o período de tempo em que foram recolhidos/registados os dados.

A terminar, pensamos que a constante monitorização dos sistemas e a utilização de técnicas estatísticas são uteis e interessantes, dado que permitem a rápida identificação de irregularidades e, eventual, intervenção e correcção, reduzindo os custos e mantendo os sistemas a funcionar mais próximo dos seus valores óptimos de produção.

8. Bibliografia/Webgrafia

- [1] Impactes Ambientais gerados pelas Centrais Termoeléctricas
(<http://www.edpsu.pt/pt/origemdaenergia/Pages/OrigensdaEnergia.aspx>) (2/3/2012).
- [2] Textos de apoio do Funcionamento da Central Termoelétrica do Pego. Central Termoelétrica do Pego, Abrantes (2012).
- [3] Sumário Segurança e Ambiente (2011)
(http://www.tejoenergia.com/filecont/sumario_ambiental2011_baixa_F.pdf) (2/10/2012).
- [4] Decreto-Lei 178/2003 de 5 de Agosto (<http://www.iapmei.pt/iapmei-leg-03.php?lei=1970>) (29/3/2012).
- [5] LCPD-Tecnologias a implementar (<http://www.tejoenergia.com/index.asp?art=70>)
(24/2/12).
- [6] Advanced Technologies for the Control of Sulfur Dioxide Emission from Coal-Fired Boilers (1999)
(<http://www.netl.doe.gov/Technologies/coalpower/cctc/Topicalreports/pdfs/Topical12.pdf>)
(5/9/12).
- [7] Electric Utility Engineer's FGD Manual Volume I-FGD Process Design (1996)
(<http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/cctc/cctdp/bibliography/misc/pdfs/fgd/M98054410.pdf>) (5/9/12).
- [8] Green Public Procurement-Wall Panels Technical Background Report (2010)
(http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/wall_panels_GPP_background_report.pdf)
(12/9/12).
- [9] FGD GYPSUM "Quality Criteria and Analysis Methods"
(http://www.eurogypsum.org/_Uploads/dbsAttachedFiles/EUROGYPSUMBD2.pdf)
(12/9/12).

- [10] Murteira, B., Ribeiro, C., Andrade e Silva, J., Pimenta, C. (2002). *Introdução à Estatística*. McGraw-Hill.
- [11] Guimarães, Rui C. e Cabral, José A. S. (2007). *Estatística*. 2.^a Edição, McGraw-Hill.
- [12] Pestana, Dinis D. e Velosa, Sílvio F. (2002). *Introdução à Probabilidade e Estatística*. Vol. I, edição da Fundação Calouste Gulbenkian.
- [13] Reis, E., Melo, P., Andrade, R., Calapez, T. (1996). *Estatística Aplicada*. Vol. I e II, Edições Sílabo.
- [14] Pedrosa, A. C. e Gama, S. M. A. (2004). *Introdução Computacional à Probabilidade e Estatística*. Porto Editora
- [15] Miller, J. C., e Miller, J. N. (1993). *Statistics for Analytical Chemistry*. Eliis Horwood.
- [16] E. Esteves, DEA – ISE Universidade do Algarve, Faro (2009). *Controlo Estatístico da Qualidade* (<http://w3.ualg.pt/~eesteves/docs/ControloEstatisticoQualidade10.pdf>) (4/6/12).
- [17] A. Helena, DEGEI – Universidade de Aveiro, Aveiro (2004). *Gestão da Qualidade*. (http://www2.egi.ua.pt/cursos_2004/files/GQ/Aula10Te11T.pdf) (4/6/12).
- [18] Esquemas de controlo de qualidade do tipo Shewhart para atributos e variáveis. (<http://www.math.ist.utl.pt/~mjmorais/FCQ2-0607-cap9.pdf>) (2/10/12).

ANEXOS

Anexo 1 – Dados das emissões de NO_x, SO₂ e partículas da Central

- Emissões de NO_x, SO₂ e partículas – 2007

Meses	Efluentes gasosos								
	SO ₂ (mg.Nm ⁻³)			NO _x (mg.Nm ⁻³)			Partículas (mg.Nm ⁻³)		
	G1	G2	Média mensal	G1	G2	Média mensal	G1	G2	Média mensal
Janeiro	1509	1342	1425,5	767	751	759	48	47	47,5
Fevereiro	*	1219	1219	*	704	704	*	62	62
Março	*	1167	1167	*	723	723	*	49	49
Abril	1205	1123	1164	781	765	773	44	66	55
Maio	1251	1182	1216,5	788	770	779	45	51	48
Junho	1158	1156	1157	762	710	736	20	52	36
Julho	1201	1178	1189,5	739	743	741	21	41	31
Agosto	1259	**	1259	713	**	713	28	**	28
Setembro	1272	**	1272	750	**	750	35	**	35
Outubro	1290	1255	1272,5	751	752	751,5	26	44	35
Novembro	1267	1219	1243	764	726	745	32	63	47,5
Dezembro	1276	1217	1246,5	770	770	770	40	68	54

*Meses 2 e 3 parados para obras LCPD; **Meses 8 e 9 parados para obras LCPD.

- Emissões de NO_x, SO₂ e partículas – 2008

	Efluentes gasosos								
	SO ₂ (mg.Nm ⁻³)			NO _x (mg.Nm ⁻³)			Partículas (mg.Nm ⁻³)		
Meses	G1	G2	Média mensal	G1	G2	Média mensal	G1	G2	Média mensal
Janeiro	1258	1257	1257,5	769	748	758,5	39	50	44,5
Fevereiro	1150	1147	1148,5	721	673	697	26	39	32,5
Março	1029	1091	1060	737	745	741	48	66	57
Abril	1089	1199	1144	706	739	722,5	60	65	62,5
Maio	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Junho	1334	1373	1353,5	604	563	583,5	52	69	60,5
Julho	1264	1337	1300,5	687	578	632,5	42	61	51,5
Agosto	1225	1342	1283,5	674	576	625	18	48	33
Setembro	195	831	513	565	546	555,5	10	28	19
Outubro	103	125	114	330	344	337	8	13	10,5
Novembro	131	167	149	395	390	392,5	8	13	10,5
Dezembro	93	143	118	160	189	174,5	4	8	6

*Grupos parados.

- Emissões de NO_x, SO₂ e partículas – 2009

	Efluentes gasosos								
	SO ₂ (mg.Nm ⁻³)			NO _x (mg.Nm ⁻³)			Partículas (mg.Nm ⁻³)		
Meses	G1	G2	Média mensal	G1	G2	Média mensal	G1	G2	Média mensal
Janeiro	113	164	138,5	178	186	182	4	10	7
Fevereiro	98	77	87,5	156	178	167	6	10	8
Março	89	81	85	143	174	158,5	5	8	6,5
Abril	89	85	87	136	163	149,5	6	9	7,5
Maió	88	75	81,5	146	155	150,5	5	7	6
Junho	95	97	96	135	162	148,5	5	7	6
Julho	76	91	83,5	140	140	140	3	6	4,5
Agosto	85	85	85	138	150	144	4	6	5
Setembro	75	88	81,5	137	156	146,5	8	7	7,5
Outubro	68	97	82,5	126	151	138,5	8	4	6
Novembro	78	101	89,5	117	153	135	2	4	3
Dezembro	81	93	87	136	166	151	2	2	2

- Emissões de NO_x, SO₂ e partículas – 2010

	Efluentes gasosos								
	SO ₂ (mg.Nm ⁻³)			NO _x (mg.Nm ⁻³)			Partículas (mg.Nm ⁻³)		
Meses	G1	G2	Média mensal	G1	G2	Média mensal	G1	G2	Média mensal
Janeiro	85	100	92,5	109	143	126	4	8	6
Fevereiro	94	114	104	113	158	135,5	4	8	6
Março	81*	150*	115,5	118*	67*	92,5	5*	11*	8
Abril	113	**	113	104	**	104	7	**	7
Maio	127	127	127	117	153	135	3	13	8
Junho	128	83	105,5	117	173	145	3	3	3
Julho	82	88	85	130	162	146	3	5	4
Agosto	90	89	89,5	156	153	154,5	1	4	2,5
Setembro	71	81	76	132	156	144	1	3	2
Outubro	48	62	55	120	150	135	1	3	2
Novembro	60	69	64,5	136	166	151	1	2	1,5
Dezembro	75	81	78	141	167	154	1	2	1,5

*praticamente não trabalhou; **Grupo 2 parado.

- Emissões de NO_x, SO₂ e partículas – 2011

	Efluentes gasosos								
	SO ₂ (mg.Nm ⁻³)			NO _x (mg.Nm ⁻³)			Partículas (mg.Nm ⁻³)		
Meses	G1	G2	Média mensal	G1	G2	Média mensal	G1	G2	Média mensal
Janeiro	96	97	96,5	133	153	143	2	8	5
Fevereiro	121	95	108	145	137	141	2	9	5,5
Março	135	*	135	144	*	144	2	*	2
Abril	86	147	116,5	150	162	156	2	8	5
Maio	106	108	107	143	161	152	2	4	3
Junho	131	146	138,5	141	163	152	2	4	3
Julho	109	117	113	109	147	128	2	5	3,5
Agosto	124	117	120,5	153	165	159	1,2	5	3,1
Setembro	90	96	93	154	171	162,5	1,4	4	2,7
Outubro	62	71	66,5	146	163	154,5	1,4	3	2,2
Novembro	67	90	78,5	160	171	165,5	1,3	3,5	2,4
Dezembro	91	111	101	173	170	171,5	1,4	3,4	2,4

*Grupo 2 parado.

Anexo 2 – Métodos de Ensaio

2.1. Gesso – Determinação da % de humidade (Gravimétrico)

1. APLICAÇÃO

Este método aplica-se à determinação da humidade do gesso pelo método gravimétrico. A humidade é determinada a uma temperatura de 40°C para que todas as propriedades do gesso permaneçam intactas. É possível encontrar nas normas ASTM a sugestão para determinação de humidade a uma temperatura de 60°C, onde justificam que temperaturas acima de 60°C promovem oxidação no gesso e destruição do grau de cristalização conduzindo a valores de pureza duvidosos. Contudo, as instruções VGB apontam para o uso dos 40°C na determinação da humidade.

A determinação da % de humidade é o ponto crítico do controlo da qualidade do gesso, pelo que o seu valor deve ser inferior a 10%.

2. NORMA DE REFERÊNCIA

VGB – *Instruction sheet: analysis of FGDP Gypsum: Determination of moisture, F – gravimetric* (Determinação da % de humidade, F-gravimetria)

3. MATERIAL UTILIZADO

- Material corrente de laboratório;
- Estufa a 40°C – 45°C;
- Balança analítica.

4. PROCEDIMENTO

- 4.1. Pesar a caixa de Petri vazia e registrar a sua massa como m_1 ;
- 4.2. Pesar aproximadamente $20g \pm 0,1g$ de gesso húmido e registrar a massa do conjunto como m_2 (m_2 – massa da caixa de Petri com gesso húmido);
- 4.3. Secar na estufa a uma temperatura entre $40^\circ C$ durante 2h:45min;
- 4.4. Arrefecer no excicador e pesar de imediato;
- 4.5. Colocar mais 15 min na estufa até garantir um peso constante;
- 4.6. Repetir os pontos 4.3. e 4.4. (até peso constante);
- 4.7. Registrar o peso final após secagem a $40^\circ C$ como m_3 (m_3 – massa da caixa de Petri mais gesso seco).

5. TRATAMENTO DOS RESULTADOS

$$H (\%) = \frac{(m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} \times 100 \left(\frac{g}{g} \right),$$

onde,

m_1 – massa da caixa de Petri vazio (g)

m_2 – massa do conjunto caixa de Petri + gesso húmido (g)

m_3 – massa do conjunto caixa de Petri + gesso após secagem a $T = 40^\circ C$ (g)

2.2. Pasta aquosa de gesso – Determinação da densidade da slurry reactor e percentagem de sólidos

1. APLICAÇÃO

Este procedimento é aplicável para a determinação da densidade e percentagem de sólidos da pasta aquosa de gesso em unidades de tratamento de gases de combustão.

Os valores de densidade para a instalação em funcionamento devem encontrar-se no intervalo 1110-1130 kg/m³; a estas densidades corresponde uma percentagem de sólidos, como mostra a Tabela I, para cada um dos reactores.

Tabela I – Densidade e percentagem de sólidos para cada um dos reactores

	Densidade (kg/m ³)	% de sólidos
REACTOR 1	1110	14,24
	1130	17,34
REACTOR 2	1110	14,24
	1130	17,34

2. NORMA DE REFERÊNCIA

EPRI – “*Electric Power Research Institute*” method D2 – “*Slurry density*” e method F1 “*Gravimetric method for weight percent solids in lime, limestone or Magnesia wet scrubber slurries*”

3. MATERIAIS UTILIZADOS

- Balões volumétricos de 50 ml + rolha;
- Balança analítica;
- Sistema de Filtração a vácuo:
 - Erlenmeyer;
 - Bomba de vácuo;
 - Papel de filtro

- Vidros de relógio;
- Estufa a 40°C
- Material corrente de laboratório.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1.Densidade

4.1.1. Calibração de balões volumétricos

- 1) Colocar um balão volumétrico de 50ml na estufa a 40°C durante 1 hora, arrefecer no excicador até à temperatura ambiente e em seguida, pesar o conjunto balão+rolha. Anotar a massa deste conjunto como **A**.
- 2) Encher o balão até ao topo com água desmineralizada;
- 3) Com um termómetro, medir a temperatura da água desmineralizada; para o efeito utilizar um copo de 250ml e colocar o termómetro até este atingir um valor de temperatura estável;
- 4) Colocar a rolha, tendo o cuidado de não introduzir bolhas de ar;
- 5) Secar bem o exterior e pesar o balão cheio de água desmineralizada. Registar a sua massa como **B**.
- 6) Remover a água do interior do balão e colocá-lo na estufa até à próxima utilização. Este balão encontra-se calibrado.

4.1.2. Determinação da densidade da pasta aquosa de gesso

- 1) Encher o balão calibrado com a amostra de pasta de gesso até ao topo, tendo o cuidado de não deixar nenhuma bolha de presa no seu interior. Limpar bem o exterior do balão, pesar e registar a sua massa como **C**.

4.2. Percentagem de Sólidos

- 1) Secar um papel de filtro na estufa, arrefecer no excicador;
- 2) Pesar e registar a sua massa como **D**;
- 3) Filtrar, no sistema a vácuo, a amostra que se encontra no balão calibrado de 50mL. Lavar o balão várias vezes para se certificar que todos os sólidos ficam retidos no filtro;
- 4) Colocar o papel de filtro, que contém os sólidos, na estufa a 40°C e deixar secar até peso constante 3 horas;
- 5) Registar a massa como **E** e calcular a % sólidos.

5. TRATAMENTO DOS RESULTADOS

5.1. Densidade

$$\rho_{pasta} (g.cm^{-3}) = \frac{(C - A)}{(B - A)} \times D_{rel}$$

onde,

ρ_{pasta} – densidade da pasta aquosa de gesso ($g.cm^{-3}$)

A – massa do balão volumétrico vazio + rolha (g)

B – massa do balão volumétrico cheio de água desmineralizada + rolha (g)

C – massa do balão volumétrico cheio de pasta de gesso + rolha (g)

D_{rel} – densidade relativa da água à temperatura de calibração dos balões⁶

5.2.% de sólidos

$$\% \text{ de sólidos} = \frac{(E - D)}{(C - A)} \times 100 \left[\frac{m}{m} \right]$$

Onde,

D – massa do papel de filtro utilizado na filtração (g)

E – massa do papel de filtro com sólidos de gesso após secagem (g)

⁶ A tabela com as densidades relativas da água para diferentes temperaturas encontra-se no ponto 2.2.1.

2.2.1. Densidades relativas da água

Table D2-1

RELATIVE DENSITY OF WATER FROM 10 TO 55°C (2)

<u>Temperature</u> <u>°C</u>	<u>Relative Density</u> <u>of Water (g/mL)</u>	<u>Temperature</u> <u>°C</u>	<u>Relative Density</u> <u>of Water (g/mL)</u>
10	0.99973	33	0.99473
11	0.99963	34	0.99440
12	0.99952	35	0.99406
13	0.99940	36	0.99371
14	0.99927	37	0.99336
15	0.99913	38	0.99299
16	0.99897	39	0.99262
17	0.99880	40	0.99224
18	0.99862	41	0.99186
19	0.99843	42	0.99147
20	0.99823	43	0.99107
21	0.99802	44	0.99066
22	0.99780	45	0.99025
23	0.99756	46	0.98982
24	0.99732	47	0.98940
25	0.99707	48	0.98896
26	0.99681	49	0.98852
27	0.99654	50	0.98807
28	0.99626	51	0.98762
29	0.99597	52	0.98715
30	0.99567	53	0.98669
31	0.99537	54	0.98621
32	0.99505	55	0.98573

2.3. Pasta aquosa de gesso – Determinação da temperatura e do pH

1. APLICAÇÃO

A determinação do pH baseia-se na medição potenciométrica da actividade dos iões H^+ , usando um eléctrodo *standard* de hidrogénio e um eléctrodo de referência. O eléctrodo de hidrogénio consiste num eléctrodo de platina “atravessado” por hidrogénio gasoso que é borbulhado a uma pressão de 101 kPa. Devido à dificuldade em usar o eléctrodo de hidrogénio, opta-se normalmente por utilizar um eléctrodo de vidro. A força electromotriz (f.e.m.) produzida no sistema do eléctrodo de vidro varia linearmente com o pH. Esta relação linear é descrita traçando a f.e.m. em função do pH para diferentes tampões. O pH das amostras é determinado por interpolação.

2. NORMA DE REFERÊNCIA

EPRI – Method C1: *Measurement of Scrubber Slurry Temperature and pH.*

3. REAGENTES E MATERIAL UTILIZADO

3.1. Padrão de pH com os seguintes valores: 4,005; 7,00; 9,180 a 25°C;

3.2. Solução de cloreto de potássio (3M) – dissolver 22,37g de cloreto de potássio, em água destilada, efectuando um aquecimento de modo a facilitar a dissolução. Transferir para um balão de 100mL e perfazer o volume.

3.3. Material de uso corrente em laboratório;

3.4. Sonda de temperatura;

3.5. Medidor de pH, constituído por, potenciómetro, eléctrodo de vidro e eléctrodo de referencia (separados ou combinados).

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Uma vez calibrado e verificado, o equipamento de pH encontra-se pronto para ler as amostras.

4.1. Lavar bem os eléctrodos (de pH e temperatura) e secá-los bem;

4.2. Mergulhar os eléctrodos na amostra onde se pretende determinar o pH;

4.3. Registrar o valor de pH lido, bem como a sua temperatura, na folha de trabalho preparada para os registos diários dos reactores;

4.4. Depois de terminar todas as leituras deve lavar-se muito bem o eléctrodo para não ficar com resíduos de sólidos da pasta aquosa de gesso.

5. TRATAMENTO DOS RESULTADOS

Não é necessário efectuar qualquer cálculo, dado que o aparelho devolve os resultados directamente.

Anexo 3 – Dados recolhidos no Laboratório Químico

3.1. Determinação do pH, condutividade (K) e Temperatura – Pasta aquosa de gesso

Tabela II – Resultados das análises efectuadas

Dia	Absorvedor 1			Absorvedor 2		
	pH	K (mS/cm)	T (°C)	pH	K (mS/cm)	T (°C)
6/2/12	5,07	40	41,1	5,48	28,06	38,4
8/2/12	5,07	32,4	32,1	5,50	28,02	31,5
14/2/12	5,03	35,5	38,2	5,33	30,5	36,7
16/2/12	4,68	39,1	39	5,15	31,5	38,8
28/2/12	4,44	40,5	40,1	4,93	34,2	41,8
1/3/12	4,58	40,4	40,5	5,06	33,3	40,4
6/3/12	4,47	42,7	42,9	5,02	32,0	40,4
8/3/12	4,95	31,7	36,9	5,10	28,37	36,4
13/3/12	5,16	39,2	39,3	5,22	29,8	39
15/3/12	5,72	31,1	31,3	5,80	30,6	37,2
20/3/12	5,12	23,89	25,3	5,61	31,9	29,6
22/3/12	5,89	37,4	35,9	5,74	28,02	34,6
27/3/12	6,17	33,1	28,8	5,79	25,31	28,4
29/3/12	-----*	-----*	-----*	5,78	32,00	39,7
3/4/12	5,89	44,8	43,4	6,01	30,0	38,8
12/4/12	5,42	49,8	44,1	5,48	30,6	41
17/4/12	5,04	47,7	40,8	5,05	27,29	41,2
24/4/12	5,74	40,6	37,6	5,40	25,75	35,1
26/4/12	5,84	40,5	42,3	5,47	30,4	40,9
3/5/12	5,20	34,9	40,5	5,64	31,7	42,3
8/5/12	5,56	29,8	37,8	5,13	30,4	35,1
10/5/12	5,40	32,9	43,5	5,06	31,8	42
15/5/12	5,34	36,1	38,4	5,21	27,5	38
17/5/12	5,75	38,5	40,7	5,28	27	38,8
22/5/12	5,69	35,5	40	6,02	30,3	41,6
24/5/12	5,78	36,1	39,1	5,94	30,3	43,3

5/6/12	5,55	32,8	42,9	5,87	30,1	41
12/6/12	5,53	24	33,2	6,14	25,3	35,9
19/6/12	5,60	27	40,6	5,89	26	39,8
21/6/12	5,59	24,4	39,3	5,98	29	37,4
26/6/12	5,46	26,9	45	5,83	29,7	45,6
3/7/12	5,53	27,9	45	5,91	35,6	43,5
5/7/12	5,41	23	37	5,84	29,5	34,7
10/7/12	5,82	29,8	35,6	5,83	31,3	37,9
12/7/12	5,53	31,9	44,1	5,76	33,3	42,3
17/7/12	5,69	30	38,2	5,80	29,9	38,7
19/7/12	5,62	29	37	5,89	31,2	39,6

*Grupo 1 parado; **Grupo 2 parado.

3.2. Determinação da Densidade – Pasta Aquosa de Gesso

Tabela III – Resultados das análises efectuadas

Dia	Densidade (média 2 ensaios) (g/cm ³)	
	Absorvedor 1	Absorvedor 2
6/2/12	1,100	1,124
14/2/12	1,110	1,119
15/2/12	1,110	1,119
16/2/12	1,115	1,109
17/2/12	1,114	1,125
22/2/12	1,117	1,152
27/2/12	1,211	1,245
28/2/12	1,120	1,121
1/3/12	1,112	1,124
6/3/12	1,121	1,112
8/3/12	1,112	1,112
13/3/12	1,143	1,138
15/3/12	1,122	1,126
20/3/12	1,102	1,124
22/3/12	1,129	1,118

27/3/12	1,134	1,125
29/3/12	-----*	1,129
3/4/12	1,128	1,125
12/4/12	1,138	1,145
17/4/12	1,122	1,111
24/4/12	1,128	1,121
26/4/12	1,137	1,133
3/5/12	1,125	1,121
8/5/12	1,120	1,128
10/5/12	1,121	1,122
15/5/12	1,122	1,117
17/5/12	1,123	1,119
22/5/12	1,130	1,119
5/6/12	1,115	1,116
12/6/12	1,112	1,116
19/6/12	1,130	1,121
21/6/12	1,124	1,118
26/6/12	1,127	1,124
3/7/12	1,133	1,135
5/7/12	1,109	1,114
10/7/12	1,123	1,120
12/7/12	1,128	1,121
17/7/12	1,130	1,119
19/7/12	1,120	1,118

*Grupo 1 parado; **Grupo 2 parado

3.3. Determinação da % de humidade – Gesso

Tabela IV – Resultados das análises efectuadas

Dia	% de humidade (Valores médios 2 ensaios)	
	Absorvedor 1	Absorvedor 2
6/2/12	7,16	5,85
7/2/12	8,42	6,09
13/2/12	5,37	6,88
14/2/12	5,62	6,15
23/2/12	7,07	5,96
24/2/12	8,68	7,76
29/2/12	7,43	8,02
2/3/12	8,36	8,00
7/3/12	5,59	7,37
8/3/12	6,09	7,02
13/3/12	9,43	7,53
15/3/12	8,35	7,77
20/3/12	7,86	6,55
22/3/12	8,28	6,29
27/3/12	9,17	6,92
29/3/12	10,93	7,42
3/4/12	8,57	8,21
10/4/12	9,56	-----**
12/4/12	7,21	-----**
17/4/12	11,84	9,53
24/4/12	9,17	10,19
3/5/12	9,42	8,10
8/5/12	11,78	7,76
10/5/12	11,35	7,88
15/5/12	9,02	8,06
17/5/12	9,02	6,50
22/5/12	14,33	8,69
24/5/12	12,90	11,55
29/5/12	10,24	6,87

31/5/12	9,26	7,56
5/6/12	8,38	7,05
8/6/12	7,71	8,75
12/6/12	11,88	9,08
15/6/12	7,63	9,04
19/6/12	8,48	7,06
21/6/12	6,63	6,85
26/6/12	7,19	7,01
3/7/12	10,49	7,87
10/7/12	7,08	6,64
12/7/12	7,09	5,70
17/7/12	8,45	8,16
19/7/12	8,15	7,33

**Grupo 2 parado